

# EFFECTOS NATURALES Y ANTRÓPICOS EN LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA

por

Juan C. Restrepo <sup>a,b</sup>, Juan D. Restrepo <sup>a,c</sup>

## Resumen

**Restrepo, J. C. & J. D., Restrepo:** Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la Cuenca del río Magdalena. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (111): 239-254. 2005. ISSN 0370-3908.

La cuenca del río Magdalena tiene una producción de sedimentos de  $689 \pm 528 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$  con valores máximos por encima de  $2000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ . Análisis de regresión múltiple indican que los principales parámetros que explican la varianza en la producción de sedimentos de la cuenca son la escorrentía y el caudal máximo. Para describir la producción de sedimentos se obtuvo un modelo numérico con una eficiencia del 58% ( $P < 0.01$ ) y un error cuadrático medio relativo (ECMR) del 11%. Los análisis de series de tiempo muestran tendencias crecientes en el transporte de sedimentos en el 68% de la cuenca del río Magdalena.

**Palabras clave:** producción de sedimentos, transporte de sedimentos, erosión, río Magdalena.

## Abstract

The Magdalena river basin sediment yield is  $689 \pm 528 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  with maximum values up to  $2000 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ . Multiple regression analysis indicates that runoff and maximum discharges are the major controls to explain Magdalena basin sediment yield variance. A numerical model with a 58% efficiency ( $P < 0.01$ ) and 11% relative root mean square error (RRMSE) was obtained to describe the Magdalena basin sediment yield. Time series analyses show that sediment load have upward trends in 68% of the Magdalena river basin.

**Key words:** sediment yield, sediment load, erosion, Magdalena river.

<sup>a</sup> Grupo de Ciencias del Mar, Departamento de Geología, Universidad EAFIT, Apartado Aéreo 3300, Medellín, Colombia.

<sup>b</sup> jrestr48@eafit.edu.co

<sup>c</sup> jdrestre@eafit.edu.co

## Introducción

La producción de sedimentos es un indicador de la cantidad de material erodado mecánicamente sobre un área dada en un período específico de tiempo y promediado para una zona específica (**Petts & Foster**, 1985); puede ser calculada estableciendo la relación entre la carga sólida transportada por un río en un sitio de referencia y el área de drenaje aguas arriba de este sitio. Los procesos erosivos que se presentan en la cuenca, el transporte de material erodado hacia la red drenaje, así como la competencia del sistema fluvial inciden en la producción de sedimentos. Por lo tanto, la producción de sedimentos es función de la interacción entre parámetros geológicos, hidrológicos y climáticos, así como de los cambios introducidos por la actividad antrópica en el sistema fluvial (**Knighton**, 1984).

A escala global, los estudios sobre producción de sedimentos se han orientado a identificar los parámetros naturales que controlan dicho proceso. Algunos autores han señalado que la producción de sedimentos es controlada, en gran medida, por la actividad tectónica y la configuración del relieve, en tanto que parámetros climáticos (i.e. precipitación, escorrentía y temperatura) presentan un papel secundario al explicar la variación en la producción de sedimentos (**Ahnert**, 1970; **Stallard**, 1988; **Pinet & Souriau**, 1988; **Milliman & Syvitski**, 1992). Partiendo de este enfoque, **Milliman & Syvitski** (1992) señalan que las mayores tasas de producción de sedimentos ( $> 5000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) se presentan en pequeñas cuencas del sudeste Asiático y Oceanía, caracterizadas por relieves altos y escarpados y por intensa actividad tectónica. Otros autores afirman que la producción de sedimentos depende de la precipitación media anual, con una respuesta ampliamente regulada por la cobertura vegetal y el tipo de clima dominante (**Holeman**, 1968; **Douglas**, 1967; **Wilson**, 1973; **Jansen & Painter**, 1974).

Investigaciones recientes (**Summerfield & Hulton**, 1994; **Ludwig & Probst**, 1998; **Hovius**, 1998; **Harrison**, 2000), sugieren que la producción de sedimentos es más una función de un conjunto combinado de parámetros físicos que de un solo factor en particular. En un contexto global, **Ludwig & Probst** (1998) encontraron que la producción de sedimentos es controlada por la escorrentía, la variación estacional de la precipitación y la pendiente del terreno, mientras que **Hovius** (1998) indica que el conjunto de variables más eficientes al explicar la varianza en la producción de sedimentos está conformado por el área de la cuenca, la altura máxima, la escorrentía, la temperatura promedio y la variación estacional de la temperatura.

Estadísticas globales sobre producción de sedimentos muestran que las cuencas tropicales presentan magnitudes relativamente altas, comparadas con los valores reportados en cuencas de otras zonas geográficas (**Milliman & Syvitski**, 1992). La producción de sedimentos en cuencas tropicales también se caracteriza por una fuerte variabilidad espacial y temporal, relacionada con los procesos tectónicos, geomorfológicos y climáticos que identifican estas zonas y particularmente con la ocurrencia de eventos de alta intensidad (i.e. sismos, fenómenos de remoción en masa, tormentas torrenciales) (**Stallard**, 1988; **Thomas**, 1994). Hasta ahora, el papel de los eventos de alta intensidad en la producción de sedimentos ha sido poco explorado (**Reading et al.**, 1995).

Para la cuenca del río Magdalena, **Milliman & Meade** (1983) estimaron una producción de sedimentos de  $900 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , mientras que **Milliman & Syvitski** (1992) y **Hovius** (1998) calcularon una producción de 920 y  $846 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , respectivamente. La utilización de una base de datos más extensa y detallada les permitió a **Restrepo & Kjerfve** (2000) obtener un resultado más confiable ( $560 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). No obstante estas investigaciones han permitido obtener estimativos más precisos de la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena, aún se desconocen los parámetros que controlan la erosión y el aporte de sedimentos desde los mayores sistemas tributarios de la cuenca.

Dada la importancia de la cuenca del río Magdalena en el contexto internacional y nacional, este estudio pretende explorar los factores naturales que controlan la producción de sedimentos de la cuenca, estimar el porcentaje de variabilidad que explica cada parámetro físico analizado y a partir de estos resultados, establecer hipótesis sobre la influencia de procesos no estacionarios de aporte de sedimentos (i.e. movimientos en masa, variabilidad climática, efectos antrópicos) sobre el transporte y la producción de sedimentos en la cuenca.

## La cuenca del río Magdalena en el contexto de la producción de sedimentos

En un contexto global, la tectónica ejerce un control de primer orden sobre la producción de sedimentos (**Pinet & Souriau**, 1988; **Stallard**, 1988; **Milliman & Syvitski**, 1992). Se ha encontrado que en cuencas de primer orden con tamaños similares, los mayores valores de producción de sedimentos se registran en áreas con influencia tectónica, presentándose diferencias hasta de 3 ordenes de magnitud con respecto a áreas geológicamente estables (**Milliman & Syvitski**, 1992). El área andina colombiana se encuentra en una zona geológicamente activa,

los valles del Magdalena y del Cauca constituyen depresiones tectónicas delimitadas por sistemas de fallas (i.e. Ibagué, Garzón-Suaza, Palestina, Bucaramanga, Cuaca-Romeral, entre otras), los cuales ejercen un marcado control estructural sobre el sistema fluvial del Magdalena (**Mojica & Franco**, 1992). Este control tectónico da lugar a movimientos relativos de bloques, exponiendo superficies levantadas a la acción de procesos erosivos.

En cuencas de orden mayor, una alta proporción de los sedimentos transportados por los ríos proviene de zonas altas y con pendientes pronunciadas ( $>35^\circ$ ), correspondientes a la parte alta de la cuenca, mientras que en la parte media y baja de la misma, el transporte y la depositación de sedimentos constituyen los procesos dominantes (**Guy**, 1970). Este patrón no está bien demarcado en el Magdalena, ya que la estructura y configuración de la cuenca (valles paralelos al sistema de cordilleras), da lugar a que los procesos de erosión, transporte y sedimentación, se presenten a lo largo de toda la cuenca. Para el valle alto del Magdalena, entre la laguna de La Magdalena y Honda, el transporte de sedimentos es de  $125 \times 10^3 \pm 107 \text{ t d}^{-1}$  y el caudal de  $1329 \pm 271 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . En el valle medio, entre Honda y el Banco, se registra un transporte de sedimentos de  $224 \times 10^3 \pm 68 \text{ t d}^{-1}$  y un caudal de  $4243 \pm 1124 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . En la parte baja de la cuenca, entre el Banco y Calamar, el transporte de sedimentos es  $393 \times 10^3 \pm 132 \text{ t d}^{-1}$  y se registra un caudal de  $7160 \pm 1885 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

De los parámetros climáticos que influyen sobre la producción de sedimentos, la precipitación ha sido el más estudiado (**Ludwig & Probst**, 1998), encontrándose que a escala global se presenta una relación compleja entre estos parámetros, con picos máximos de producción de sedimentos en zonas áridas con precipitaciones de  $250 \text{ mm a}^{-1}$ , en áreas mediterráneas húmedas ( $1250\text{-}1350 \text{ mm a}^{-1}$ ) y regiones tropicales muy húmedas ( $>2500 \text{ mm a}^{-1}$ ) (**Walling & Kleo**, 1979). En la cuenca del Magdalena se presenta una alta variabilidad en la precipitación, tanto a

escala temporal como espacial. El valle alto tiene una precipitación promedio de  $1500 \text{ mm a}^{-1}$ , el valle medio de  $2200 \text{ mm a}^{-1}$ , mientras que en el bajo Magdalena se presentan precipitaciones del orden de  $1600 \text{ mm a}^{-1}$ . Las mayores precipitaciones ( $>4000 \text{ mm a}^{-1}$ ) se registran en la parte media de la Cordillera Central y sobre las estribaciones de la Cordillera Occidental (**Mesa et al.**, 1997). En la Tabla 1 se presentan el área de drenaje y algunas características climáticas e hidrológicas de las zonas geomorfológicas en las que se divide la cuenca.

Estudios regionales han mostrado que la conversión de bosques en áreas agrícolas y ganaderas genera incrementos en la producción de sedimentos (**Dunne**, 1979; **Braud et al.**, 2001; **Krishnaswamy et al.**, 2001; **Walling & Fang**, 2003). En Asia, se han registrado aumentos superiores al 75% en el transporte de sedimentos como resultado de la intensificación de actividades agrícolas; tales incrementos pueden alcanzar hasta un orden de magnitud dependiendo de las características litológicas y climáticas de las áreas intervenidas (**Walling & Fang**, 2003). En Colombia se han comunicado aumentos en los procesos erosivos relacionados con (i) la conversión de bosques en pastos para ganadería, (ii) el desarrollo de actividades agrícolas en zonas de fuertes pendientes y (iii) la construcción y operación de obras de infraestructura (**Ministerio de Agricultura**, 1977; **IDEAM**, 1998; **IDEAM**, 2001). Sin embargo, aún no se ha cuantificado el efecto y la magnitud que las actividades antrópicas han tenido en el transporte y la producción de sedimentos de la cuenca del Magdalena durante los últimos 30 años.

## Datos y análisis

### 1. Caracterización física de las cuencas tributarias de segundo orden

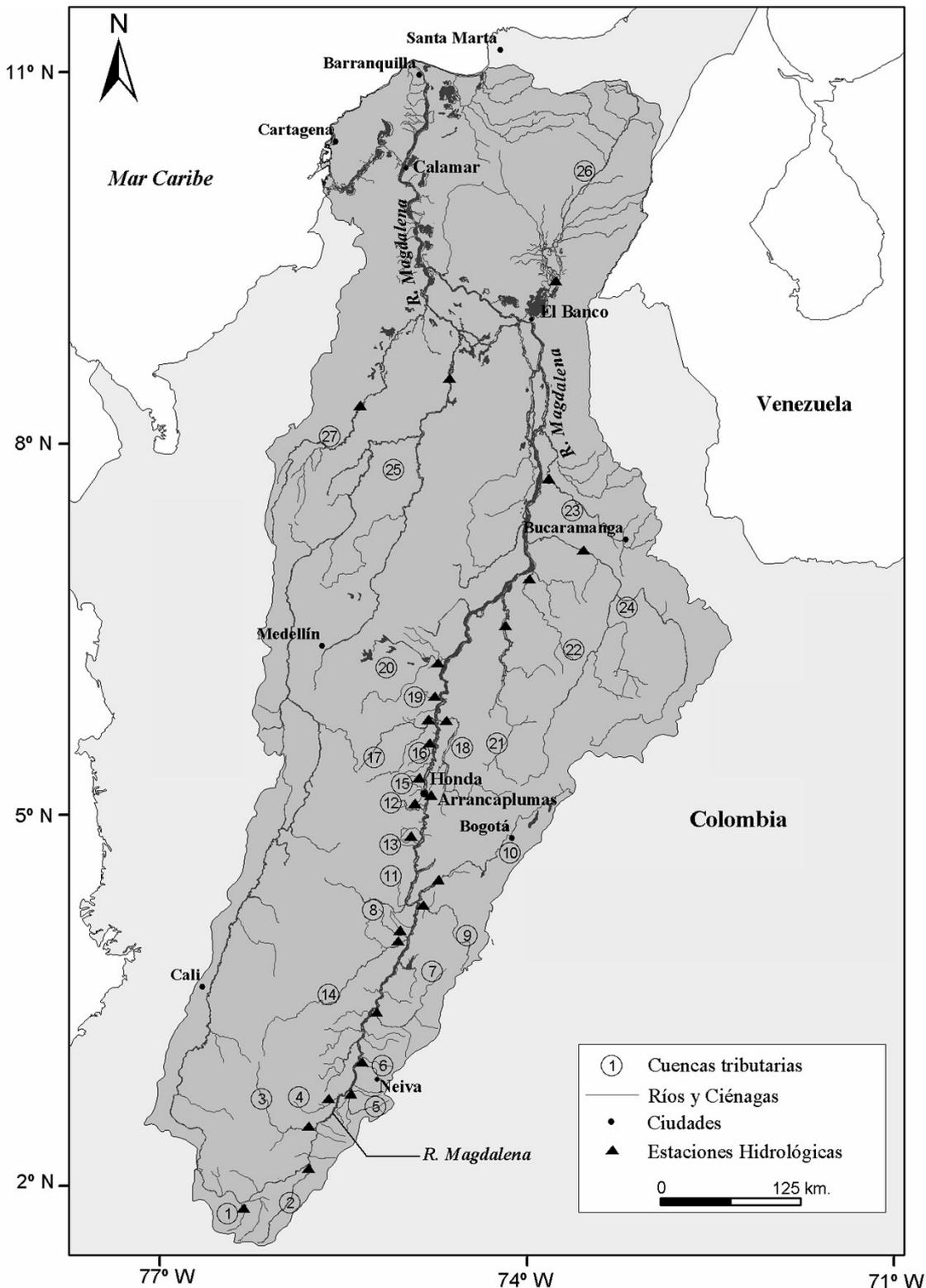
Se seleccionaron 27 cuencas tributarias de segundo orden del río Magdalena (Figura 1) de acuerdo con la dis-

**Tabla 1.** Área de drenaje y principales características climáticas e hidrológicas de las zonas geográficas en las que se divide la cuenca del Magdalena. Las estaciones a) Arrancaplumas, b) El Banco y c) Calamar se muestran en la Figura 1.

	A <sup>(1)</sup> (km <sup>2</sup> )	P <sup>(2)</sup> (mm a <sup>-1</sup> )	Q <sup>(3)</sup> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	R <sup>(2)</sup> (mm a <sup>-1</sup> )	R/P <sup>(2)</sup> (-)	Sa <sup>(3)</sup> (x10 <sup>3</sup> t d <sup>-1</sup> )
Alto Magdalena <sup>a</sup>	55,937	1,535	1,341	901	0.59	148.2
Medio Magdalena <sup>b</sup>	83,514	2,185	4,224	1,259	0.58	189.2
Bajo Magdalena <sup>c</sup>	43,360	1,632	7,106	702	0.43	380.6

Nota: A = área de la cuenca medida en la estación hidrológica de referencia, P = precipitación promedio anual, Q = caudal promedio, R = escorrentía específica, R/P = coeficiente de escorrentía, Sa = transporte promedio de sedimentos en suspensión.

Fuente: <sup>(1)</sup> IDEAM, 1995; <sup>(2)</sup> IDEAM, 2001; <sup>(3)</sup> IDEAM, 2003.



**Figura 1.** Cuenca del río Magdalena incluyendo las principales cuencas tributarias (círculos numerados) y las estaciones hidrológicas del IDEAM utilizadas para este estudio (triángulos sólidos); el nombre de las cuencas tributarias y su correspondiente numeración es presentada en la Tabla 2.

ponibilidad de datos de transporte de sedimentos en suspensión y se recolectó información morfométrica, topográfica, climática e hidrológica, con el fin de realizar una caracterización física de cada una de ellas (Tabla 2). La definición detallada de los parámetros físicos incluidos en este estudio puede ser consultada en **Hovius** (1998).

Los datos de caudal y transporte de sedimentos fueron obtenidos de los registros históricos del **IDEAM** (2003). En cada una de las 27 cuencas tributarias se obtuvo información multi-temporal de la estación hidrológica más cercana a la desembocadura en el río Magdalena (Figura 1), ya que se asume que la carga de sedimentos registrada en este punto refleja la sumatoria de todos los procesos erosionales y depositacionales que ocurren al interior de la cuenca (**Knighton**, 1984; **Petts & Foster**, 1985). Los registros originales del **IDEAM** (2003) incluyeron valores diarios de caudales ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), concentración de sedimentos en suspensión ( $\text{kg m}^{-3}$ ) y transporte de sedimentos ( $\text{t d}^{-1}$ ).

Mediciones simultáneas de nivel, caudal y concentración de sedimentos en suspensión fueron tomadas por el **IDEAM** entre 1971 y 2000, durante condiciones de caudales altos, intermedios y bajos. Las lecturas diarias de nivel son convertidas a caudal por medio de la ecuación de calibración correspondiente. Posteriormente, los valores de transporte de sedimentos en suspensión son obtenidos a partir de las medidas diarias de concentración de sedimentos y su relación con el caudal por medio de curvas de calibración (**Guy**, 1970). La longitud de las series de transporte de sedimentos de las cuencas tributarias varía entre 10 y 29 años para el período comprendido entre 1972 y 2000. En el 16% de las cuencas tributarias la longitud de las series de transporte de sedimentos es igual o superior a 25 años y ninguna presenta series inferiores a 10 años. La producción de sedimentos, expresada en  $\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$ , se obtuvo como el cociente entre el promedio interanual de transporte de sedimentos ( $\text{t a}^{-1}$ ) y el área de la cuenca medida en la estación hidrológica de referencia ( $\text{km}^2$ ).

Los datos morfométricos y topográficos fueron calculados a partir de cartografía IGAC a escala 1: 500.000 (**IDEAM**, 2001). Los datos de precipitación fueron obtenidos del software Hidro-SIG v.1.8, un sistema de información geográfica con énfasis en el manejo de información hidro-climática, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia seccional Medellín (**Vélez et al.**, 2000). Los datos de precipitación total y máxima se calcularon a partir del promedio de los valores medios multi-anales correspondientes a las estaciones climatológicas ubicadas en las zonas erosionales de cada cuenca, ya que se asume que gran porcentaje de la carga de sedimentos registrada en una estación hidrológica proviene de las zo-

nas erosionales aguas arriba de la misma (**Hovius**, 1998). Por medio del análisis espectral de 16 imágenes Landsat TM, el **IDEAM** (2001) elaboró un mapa de intensidad de erosión para Colombia el cual fue validado con información bibliográfica de parámetros físicos y de usos del suelo (i.e. tipo de suelo, tipo de cobertura vegetal, distribución de cobertura vegetal, morfología). En este mapa se identificaron 5 niveles de intensidad de erosión, desde muy baja hasta muy alta. Para este estudio se consideraron las estaciones climatológicas ubicadas en zonas de moderada, alta y muy alta intensidad de erosión.

## 2. Análisis de regresión simple y múltiple

Con el fin de identificar los parámetros físicos que controlan la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena, se desarrollaron regresiones simples y múltiples entre este parámetro (variable dependiente) y un conjunto de 13 parámetros físicos. Para ello, se utilizó la información morfométrica, topográfica, climática e hidrológica recolectada en las 27 cuencas caracterizadas (Tabla 2).

Para el análisis de regresión múltiple se seleccionó la metodología de regresión por etapas. Este método examina el conjunto finito de modelos formados por las variables independientes, seleccionando dentro del modelo final aquel conjunto más eficiente al explicar la varianza de la variable dependiente. Este procedimiento no elige automáticamente los parámetros con mayores coeficientes de correlación, ya que éstos pueden explicar la misma proporción de la varianza. Entonces es probable que parámetros con bajos coeficientes de correlación se incluyan en el modelo final, ya que explican una parte de la varianza que no ha sido explicada por ningún otro parámetro (**Bowerman & O'Connell**, 1987).

La eficiencia y precisión de los modelos estadísticos fue evaluada por medio del coeficiente de determinación de la regresión ( $r^2$ ) y el error cuadrático medio relativo (ECMR). El ECMR proporciona una estimación del error asociado con la regresión y es independiente de las unidades en que se expresan los datos de la misma (**Bowerman & O'Connell**, 1987). Este estimador es calculado mediante la siguiente expresión,

$$ECMR = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - c_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_i} \quad (1)$$

**Tabla 2.** Parámetros morfométricos, topográficos, climáticos e hidrológicos calculados para las cuencas tributarias estudiadas. La localización geográfica de cada subcuenca es mostrada en la Figura 1.

Cuenca	Morfométricos			Topográficos							Climáticos			Hidrológicos					
	A <sup>(1)</sup> (km <sup>2</sup> )	L <sub>b</sub> (km)	L <sub>r</sub> <sup>(2)</sup> (km)	H <sup>(2)</sup> (m)	H <sub>max</sub> <sup>(2)</sup> (m)	H <sub>min</sub> <sup>(2)</sup> (m)	H <sub>max</sub> <sup>*</sup> (m)	H <sub>pk</sub> (-)	H <sub>r</sub> (mkm <sup>-1</sup> )	?	P <sup>(3)</sup> (mm a <sup>-1</sup> )	P <sub>max</sub> <sup>(3)</sup> (mm m <sup>-1</sup> )	P <sub>pk</sub> (-)	Q <sup>(4)</sup> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Q <sub>max</sub> <sup>(4)</sup> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Q <sub>pk</sub> (-)	R (mm a <sup>-1</sup> )	S <sub>a</sub> <sup>(4)</sup> (Mta <sup>-1</sup> )	P <sub>s</sub> (tkm <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )
1.Guarapas	503	49	56	1,730	2,200	1,259	941	0.786	19	16.8	1,460	172	8.51	8	144	0.055	495	0.1	13
2.Suaza	989	62	89	1,640	2,450	845	1,605	0.669	26	18.0	1,576	180	8.74	44	745	0.059	1,390	0.6	57
3.Páez	4,078	85	127	2,330	4,200	587	3,613	0.555	42	28.4	1,495	173	8.62	185	1,694	0.109	1,429	3.2	78
4.Yaguara	1,386	61	59	1,770	2,260	505	1,755	0.783	29	29.7	1,611	258	6.25	15	458	0.033	343	0.8	59
5.Neiva	756	44	71	1,640	2,600	468	2,132	0.631	49	30.0	1,773	215	8.25	17	375	0.045	702	0.3	33
6.Ceibas	220	36	39	1,600	1,650	443	1,207	0.970	33	31.3	1,451	160	9.09	5	118	0.041	694	0.1	58
7.Cabrera	2,446	94	115	1,750	4,000	356	3,644	0.438	39	31.7	1,159	166	7.00	71	848	0.084	914	1.8	75
8.Luisa	342	80	98	830	3,000	275	2,725	0.277	34	27.8	1,780	226	7.88	9	725	0.013	836	0.1	18
9.Sumapaz	2,435	72	137	2,120	4,000	260	3,740	0.530	52	27.3	1,766	235	7.52	43	988	0.043	555	0.5	20
10.Bogotá	5,544	167	305	2,280	3,200	258	2,942	0.713	18	9.6	923	126	7.33	39	606	0.064	220	1.3	23
11.Coello	1,580	78	108	2,080	3,750	252	3,498	0.555	45	32.4	1,346	163	8.26	40	2,202	0.018	802	1.6	103
12.Lagunilla	663	54	88	1,900	5,000	217	4,783	0.380	88	54.4	1,079	130	8.28	18	624	0.029	854	0.2	30
13.Recio	610	62	76	2,170	4,900	221	4,679	0.443	76	61.6	1,993	267	7.46	20	518	0.038	1,011	0.2	25
14.Saldaña	7,009	165	199	1,900	2,060	275	1,785	0.922	11	9.0	2,316	353	6.56	320	2,574	0.124	1,441	8.9	1,27
15.Gualí	480	77	96	1,640	4,800	193	4,607	0.342	60	48.0	2,053	296	6.93	23	1,164	0.020	1,514	0.2	40
16.Guarino	976	66	92	2,350	3,100	188	2,912	0.758	44	31.7	3,853	521	7.40	34	504	0.067	1,085	0.5	46
17.La Miel	2,121	86	104	1,560	2,650	150	2,500	0.589	29	24.0	4,477	612	7.31	243	1,903	0.128	3,618	2.7	1,25
18.Negro	4,604	111	214	1,200	3,500	152	3,348	0.343	30	15.6	1,460	213	6.85	136	1,620	0.084	930	8.0	1,73
19.Cocorna	799	35	86	530	2,200	134	2,066	0.241	59	24.0	3,651	423	8.63	56	700	0.080	2,203	0.6	74
20.Nare	5,711	110	187	1,410	3,000	125	2,875	0.470	26	15.4	2,594	320	8.10	396	2,850	0.139	2,189	2.6	45
21.Carare	4,943	173	274	1,010	3,600	88	3,512	0.281	20	12.8	2,638	348	7.58	232	2,476	0.094	1,479	10.9	2,20
22.Opón	1,698	91	179	790	2,000	79	1,921	0.395	21	10.7	3,212	301	10.66	90	566	0.159	1,670	3.4	1,97
23.Lebrija	3,500	150	258	1,030	3,700	49	3,651	0.278	24	14.2	2,442	324	7.54	90	1,000	0.090	813	4.4	1,25
24.Sogamoso	21,513	219	348	2,200	3,800	70	3,730	0.579	17	10.7	1,997	289	6.92	488	4,343	0.112	715	11.2	52
25.Cauca	59,615	789	1183	1,440	4,200	20	4,180	0.343	5	3.5	1,887	243	7.77	2,373	4,985	0.476	1,255	49.1	82
26.Cesar	16,657	232	379	500	1,850	27	1,823	0.270	8	4.8	1,575	154	10.21	53	199	0.268	101	0.2	1
27.S.Jorge	4,463	274	395	240	3,150	18	3,132	0.076	11	7.9	1,670	248	6.72	198	958	0.207	1,400	2.5	55

Nota: A = área de la cuenca, L<sub>b</sub> = longitud de la cuenca, L<sub>r</sub> = longitud del río, H = altura promedio, H<sub>max</sub> = altura máxima, H<sub>min</sub> = altura mínima, H<sub>max</sub>\* = altura máxima efectiva (H<sub>max</sub> - H<sub>min</sub>), H<sub>pk</sub> = índice de relieve (H/H<sub>max</sub>), H<sub>r</sub> = cociente de relieve (H<sub>max</sub>\*/L<sub>b</sub>), a = pendiente del río (H<sub>max</sub>\*/L<sub>r</sub>), P = precipitación total anual (sobre las partes erosionales de la cuenca), P<sub>max</sub> = precipitación en el mes más lluvioso, P<sub>pk</sub> = índice de precipitación (P/P<sub>max</sub>), Q = caudal promedio, Q<sub>max</sub> = promedio en el mes de caudales máximos, Q<sub>pk</sub> = pico máximo de descarga (Q/Q<sub>max</sub>), R = escorrentía específica (Q/A), S<sub>a</sub> = transporte de sedimentos en suspensión, P<sub>s</sub> = producción de sedimentos (S<sub>a</sub>/A). Para una definición más detallada de estos parámetros véase Hovius (1998).

Fuente: <sup>(1)</sup> IDEAM, 1995; <sup>(2)</sup> IDEAM, 2001; <sup>(3)</sup> Hidro-SIG (Vélez et al., 2002); <sup>(4)</sup> IDEAM, 2003.

donde  $n$  es el número de datos,  $O_i$  el  $i$ -ésimo valor observado y  $C_i$  el  $i$ -ésimo valor calculado. Además, se desarrolló una prueba  $t$  pareada (**Montgomery & Runger, 1996**) para comparar los datos observados frente a los datos calculados por medio del modelo.

### 3. Selección de datos máximos de transporte de sedimentos

Se seleccionaron 8 cuencas tributarias con el objeto de identificar datos máximos en las series de transporte de sedimentos y establecer hipótesis sobre su magnitud y eventos detonantes (i.e. fenómenos de movimientos en masa, tormentas, influencia antrópica). De las cuencas seleccionadas, cinco corresponden a la cuenca alta del Magdalena (Guarapas, Suaza, Páez, Yaguara y Cabrera) y las restantes están ubicadas en la Cordillera Oriental, sobre la parte media de la cuenca (Negro, Carare y Opón). Las primeras fueron seleccionadas por mostrar un fuerte incremento en el transporte de sedimentos a partir de 1990, mientras que las últimas por presentar altos valores de producción de sedimentos en comparación con las demás cuencas incluidas en este estudio.

La normalización de datos ha sido utilizada para identificar eventos máximos en series de datos, empleando criterios de selección que varían de acuerdo con el objeto de estudio. Por lo tanto, se realizó una normalización de los valores mensuales de transporte de sedimentos tomando como referencia el promedio interanual, por lo que el dato normalizado representa la distancia del valor original con respecto al promedio, en términos de desviaciones estándar. Para este análisis, se considera como dato máximo aquel cuyo valor excede dos desviaciones estándar ( $>2\sigma$ ) (i.e. **Camilloni & Barros, 2003; Farnsworth & Milliman, 2003**), ya que así se garantiza la selección de datos con diferencias significativas con respecto al promedio interanual.

### 4. Análisis preliminar de cambios en el uso del suelo

Para analizar de manera preliminar la incidencia del cambio en los usos del suelo sobre la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena, se cuantificó el cambio en las coberturas del suelo durante el período comprendido entre 1970 y 1990. Para ello se obtuvieron 26 imágenes de satélite multi-espectrales ortorrectificadas (corrección atmosférica), 13 correspondientes a la década de 1970 (Landsat MSS) y las demás a la década de 1990 (Landsat TM) (**IDEAM, 2001**). Las imágenes fueron georreferenciadas y corregidas geométricamente (**Chuvieco, 2000**) usando mapas topográficos IGAC a escala 1: 25.000. Con estas imágenes se elaboraron dos mosaicos de usos del

suelo de la cuenca del Magdalena (1970-1990). Estos mosaicos se procesaron mediante una clasificación no supervisada en la que se obtuvieron más de 100 categorías de usos del suelo (**IDEAM, 2001**). Finalmente, se aplicó un proceso de filtrado y de reclasificación de coberturas (modificadas a partir de **IDEAM, 2001**) para obtener las siguientes categorías de uso del suelo: (i) bosques, (ii) agroecosistemas herbáceos, (iii) cultivos misceláneos, (iv) rastrojo alto, (v) ríos, (vi) nieve, (vii) páramo, (viii) manglar, (ix) xerofítas, y (x) ciudades.

## Resultados y discusión

### 1. Producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena

Las cuencas tributarias analizadas exhiben un amplio rango de características morfométricas, topográficas, climatológicas e hidrológicas (Tabla 2). En algunos casos, el rango de valores obtenido alcanza hasta tres ordenes de magnitud, por ejemplo, los caudales fluctúan entre 8 y  $2.3 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , mientras que las áreas de drenaje oscilan entre  $2.2 \times 10^2$  y  $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ . El rango de variación para los demás parámetros es generalmente de un orden de magnitud y las menores variaciones se presentan en el índice de precipitación y en la precipitación máxima, que varían entre 6.25 y 10.66 y 126 y 612  $\text{mm m}^{-1}$ , respectivamente (Tabla 2).

La producción de sedimentos promedio para la cuenca es de  $689 \pm 527 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , lo que implica una denudación mecánica de  $0.46 \text{ mm a}^{-1}$  si se considera una densidad de roca de  $1500 \text{ kg m}^{-3}$  (**Milliman, J.; Hermelin, M.**, comunicación personal). Las cuencas del Carare, Opón y Negro presentan los mayores valores de producción de sedimentos con 2200, 1973 y  $1730 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , respectivamente, los cuales sobrepasan el doble del promedio de la cuenca. Once de las cuencas estudiadas exceden el promedio, 7 de ellas con una producción de sedimentos superior a  $1000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ . Los valores más bajos se presentan en los ríos Cesar ( $10 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) y Gurapas ( $128 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), con valores inferiores a la cuarta parte del promedio de la cuenca ( $<172 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) (Tabla 2).

Los valores de producción de sedimentos registrados en cuencas de segundo orden (**Krishnaswamy et al., 2001; Higgitt & Lu, 2001; Verstraeten & Poesen, 2001; Xu & Cheng, 2002; Verstraeten et al., 2003**), generalmente corresponden a cuencas con áreas de drenaje inferiores a  $10\,000 \text{ km}^2$ , donde las características locales (i.e. composición litológica, morfología, régimen de lluvias, procesos de intervención antrópica) dan lugar a diferencias hasta de tres ordenes de magnitud en la producción de sedimentos,

lo que hace complejo cualquier tipo de comparación entre los valores reportados en cuencas de segundo orden.

Estimaciones globales sobre la distribución espacial de la producción de sedimentos (**Walling & Webb**, 1983) permiten afirmar que la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena es relativamente alta ( $>500 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), mientras que los mayores valores encontrados en la cuenca (i.e. Carare, Opón, Negro, Saldaña, Lebrija) pueden catalogarse como muy altos en un contexto global ( $>1000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). Esto último puede ser explicado, en gran medida, por la actividad tectónica que caracteriza la cuenca del Magdalena (**Pinet & Souriau**, 1988; **Stallard**, 1988).

Además del factor tectónico, las características litológicas de las cuencas y la actividad antrópica aparecen como las principales causas de las altas tasas de producción de sedimentos. Los ríos Carare, Opón, Negro y Lebrija drenan suelos derivados de rocas sedimentarias, con pendientes moderadas a fuertes y altos niveles de precipitación ( $2600\text{-}3200 \text{ mm a}^{-1}$ ). Estas condiciones propician altas tasas de producción de sedimentos ya que los suelos se erosionan con relativa facilidad, con una alta proporción de este material siendo transportado hasta la red drenaje por escorrentía superficial y por lo tanto los ríos tienen gran capacidad de transporte (**Guy**, 1970; **Stallard**, 1988).

En cuanto a la actividad antrópica, se ha documentado como la alteración de la morfología superficial del terreno, la modificación de los patrones de escorrentía superficial y la mayor susceptibilidad ante la erosión en zonas intervenidas por minería producen incrementos hasta de 2-3 veces en la producción de sedimentos (**Walling & Fang**, 2003). En Asia, por ejemplo, se han registrado incrementos hasta del 50% en la producción de sedimentos como resultado de la expansión de la minería (**Walling & Fang**, 2003). En el río Minero, principal tributario del río Carare, se han registrado concentraciones de sedimentos en suspensión mayores de  $2000 \text{ mg L}^{-1}$  como producto de la extracción de esmeraldas (**IDEAM**, 2001), mientras que la explotación aurífera en el río Saldaña es la segunda en extensión en la cuenca del Magdalena, con una área de  $\sim 770 \text{ km}^2$  (**UPME**, 2004).

## 2. Parámetros físicos que controlan la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena

El análisis de regresión señala que el mayor porcentaje de varianza en la producción de sedimentos es explicado por la escorrentía y la precipitación promedio anual, con el 16% y el 14%, respectivamente. El porcentaje de varianza explicado por el resto de parámetros físicos es muy bajo y en general es inferior al 10%. Considerando que la relación

entre la producción de sedimentos y determinados parámetros físicos se describe mejor en términos de funciones logarítmicas (**Knighton**, 1984; **Milliman & Syvitski**, 1992), se efectuó una transformación logarítmica de los datos y se desarrolló un nuevo análisis de regresión. Se encontraron correlaciones positivas y relativamente altas entre la producción de sedimentos y la escorrentía ( $r^2 = 0.51$ ,  $P < 0.01$ ) y el caudal máximo ( $r^2 = 0.36$ ,  $P < 0.01$ ). Los coeficientes de correlación entre los datos transformados de producción de sedimentos y los parámetros morfométricos, topográficos, climáticos e hidrológicos analizados se presentan en la Tabla 3.

Con el fin de obtener un modelo estadístico más eficiente en términos de la varianza explicada, se realizó una regresión múltiple por etapas entre la producción de sedimentos y los parámetros físicos (Tabla 2). Se encontró que la escorrentía ( $R$ ) y caudal máximo ( $Q_{\max}$ ) conforman el conjunto de parámetros más eficiente al explicar la varianza en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. Por lo tanto, la producción de sedimentos en el Magdalena puede ser expresada por la siguiente ecuación,

$$\text{Log}_{10}(P_s) = 0.81\text{Log}_{10}(R) + 0.39\text{Log}_{10}(Q_{\max}) - 0.88 \quad (2)$$

El modelo descrito por la ecuación (2) está basado en los datos de 26 cuencas tributarias de segundo orden del río Magdalena (Tabla 2) y explica el 58% ( $r^2 = 0.58$ ) de la varianza en la producción de sedimentos (Figura 2A). La varianza restante (42%) no puede ser explicada en términos de las variables independientes incluidas en este estudio y puede estar relacionada con (i) el error asociado a los datos, (ii) el efecto del componente antrópico sobre la producción de sedimentos, (iii) la variabilidad espacial en la producción de sedimentos y (iv) el efecto de los procesos no estacionarios de aporte de sedimentos (i.e. fenómenos de remoción en masa, tormentas torrenciales) (**VanSickel & Beschta**, 1983; **Lane et al.**, 1996).

La incorporación de una o más variables independientes no contribuye en mejorar significativamente el poder explicativo del modelo descrito por la ecuación (2). Se estimó un ECMR del 11%, lo cual implica que el 67% de los valores calculados tienen un error inferior al 11%, mientras que el 95% tienen errores menores al 22% (Figura 2A). La aplicación de una prueba  $t$  pareada entre los valores observados y calculados en cada tributario, indica que no existen diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) entre dichos valores.

Los datos de producción de sedimentos observados en los tributarios presentan un buen ajuste con respecto al modelo general. Las mayores diferencias se presentan en

**Tabla 3.** Matriz de coeficientes de correlación entre los parámetros morfométricos, topográficos, climáticos e hidrológicos (datos transformados), utilizados en el análisis de regresión múltiple (regresión por etapas).

	Topográficos							Climáticos			Hidrológicos		
	$P_s$	A	H	$H_{max}$	$H_{pk}$	$H_r$	$\alpha_r$	P	$P_{max}$	$P_{pk}$	Q	$Q_{max}$	$Q_{pk}$
A	0.04												
H	0.11	-0.10											
$H_{max}$	0.21	0.17	0.18										
$H_{pk}$	0.02	-0.11	<b>0.85</b>	-0.31									
$H_r$	0.09	<b>-0.76</b>	0.35	0.30	0.15								
$\alpha$	0.06	<b>-0.80</b>	<b>0.43</b>	0.25	0.24	<b>0.95</b>							
P	0.34	-0.04	-0.20	-0.11	-0.05	0.00	-0.03						
$P_{max}$	<b>0.43</b>	-0.01	-0.12	-0.01	-0.03	0.01	0.01	<b>0.94</b>					
$P_{pk}$	-0.31	-0.08	-0.24	-0.31	-0.06	-0.02	-0.15	0.07	-0.23				
Q	<b>0.43</b>	<b>0.84</b>	-0.11	0.26	-0.18	<b>-0.58</b>	-0.63	0.28	0.32	-0.13			
$Q_{max}$	<b>0.60</b>	<b>0.55</b>	0.16	<b>0.522</b>	-0.05	-0.20	-0.22	0.19	0.30	-0.36	<b>0.80</b>		
$Q_{pk}$	0.08	<b>0.79</b>	-0.36	-0.104	-0.23	<b>-0.73</b>	-0.79	0.26	0.20	0.16	<b>0.78</b>	0.27	
R	<b>0.71</b>	-0.15	-0.04	0.191	-0.13	0.27	0.20	<b>0.60</b>	<b>0.62</b>	-0.09	<b>0.40</b>	<b>0.53</b>	0.10

Nota: La denominación de los parámetros es explicada en la Tabla 2.

Los coeficientes de correlación en negrilla e itálica son significativos a un nivel de confianza del 95%.

Los coeficientes de correlación en negrilla son significativos a un nivel de confianza del 99%.

los ríos Cesar, Nare y Luisa, cuyos valores son sobre-estimados por este modelo (Figura 3). En estos tributarios es probable que la sobre-estimación sea causada por la retención de sedimentos en embalses y lagunas, ya que estos sistemas presentan altas tasas de depositación de sedimentos y por lo tanto, tasas de transporte por debajo de los niveles esperados (Syvitski et al., 2003). La cuenca del Cesar posee un sistema de ciénagas con una extensión de ~235 km<sup>2</sup> y la cuenca del Nare presenta una red de embalses que cubre un área de ~50 km<sup>2</sup>. Para el río Luisa no se tiene una explicación consistente al respecto.

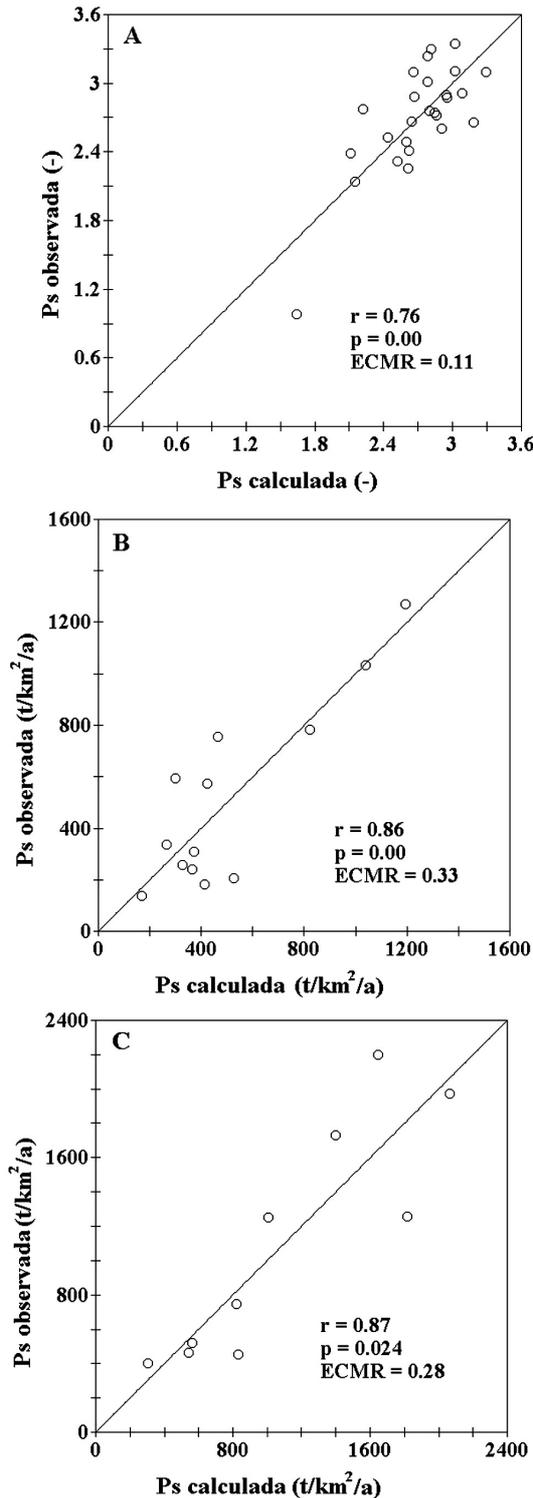
Las relaciones encontradas entre producción de sedimentos y escorrentía y caudal máximo resaltan la importancia de los procesos de erosión hídrica superficial y capacidad fluvial en la cuenca del Magdalena. La importancia de estos procesos sobre la producción de sedimentos ha sido previamente documentada a escala global (Summerfield & Hulton, 1994; Hovius, 1998; Ludwig & Probst, 1998; Harrison, 2000) y regional (Douglas, 1967; Krishnaswamy et al., 2001; Higgitt & Lu, 2001; Braud et al., 2001).

La importancia de la escorrentía ha sido relacionada con la disponibilidad de agua dentro del sistema para producir erosión, principalmente por escurrimiento superficial y con la capacidad para transportar el material erodado hasta la red de drenaje (Ludwig & Probst, 1998; Harrison, 2000). Las

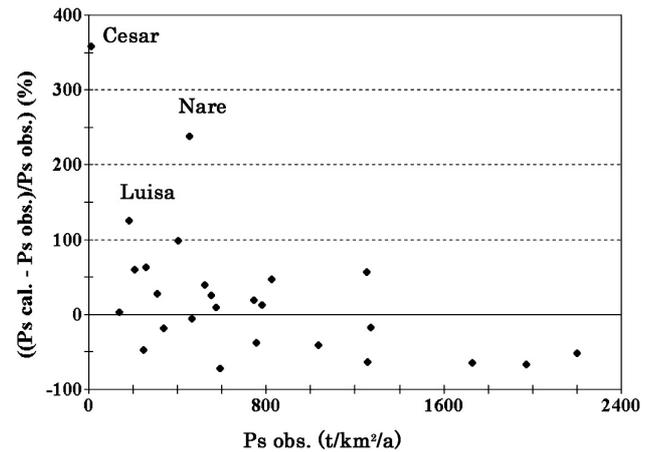
altas correlaciones entre escorrentía y precipitación y precipitación máxima (Tabla 3) brindan una explicación acerca del control que ejercen estos parámetros climáticos sobre la producción de sedimentos, particularmente en lo que respecta a la fragmentación de suelo por impacto de gotas de lluvia (Ludwig & Probst, 1998; Harrison, 2000).

A escala global la producción de sedimentos presenta una relación directa con el relieve, como variable subrogada del control tectónico (i.e. Ahnert, 1970; Pinet & Souriau, 1988; Milliman & Syvitski, 1992), e inversa con el área de drenaje de la cuenca (i.e. Milliman y Syvitski, 1992; Hovius, 1998; Harrison, 2000). Pinet & Souriau (1988) indican que la altura media de la cuenca explica el 81% de la varianza en la producción de sedimentos en cuencas con orogenias recientes (<250 Ma). También se ha mostrado que cuencas con alturas de >3000 m. tienen una producción de sedimentos hasta de 2 y 3 ordenes de magnitud mayor que cuencas de tamaño similar con elevaciones entre 100 m. y 500 m., lo cual implica que el factor tectónico ejerce un control en escala de varios ordenes de magnitud sobre la producción de sedimentos (Milliman & Syvitski, 1992).

En cuencas de alto relieve ( $H_{max} > 3000$  m.) la producción de sedimentos se incrementa entre 5 y 9 veces por descensos de un orden de magnitud en el área de drenaje (Milliman;



**Figura 2.** Valores observados frente a valores calculados de producción de sedimentos, para los modelos general (A), alto Magdalena (B) y medio Magdalena (C); en cada ventana se muestra el coeficiente de correlación ( $r$ ), el valor  $p$  de la prueba  $F$  de significancia ( $p$ ) y el error cuadrático medio relativo (ECMR) de la regresión.



**Figura 3.** Diferencias entre los valores calculados a partir del modelo general y los valores observados de producción de sedimentos para las 26 cuencas tributarias; las diferencias positivas indican que el valor calculado es mayor que el valor observado, mientras que las diferencias negativas indican lo contrario.

1997). Esta relación inversa es explicada en cuencas con áreas menores a  $5000 \text{ km}^2$  en términos de: (i) la baja capacidad de almacenamiento de sedimentos (Trimble, 1977), (ii) mayores gradientes topográficos que favorecen la dinámica de procesos erosivos y el transporte de sedimentos hasta la red de drenaje (Ludwig & Probst, 1998) y (iii) el efecto discernible de eventos de alta intensidad (i.e. movimientos en masa, tormentas torrenciales) (Milliman, 1997).

Este estudio no mostró correlaciones significativas entre la producción de sedimentos y el área de drenaje y ningún otro parámetro topográfico. Esto se debe a que en análisis regionales, específicamente en cuencas con áreas menores a  $5000 \text{ km}^2$ , las características locales (i.e. clima, litología, vegetación) tienen un mayor peso sobre las variaciones en la producción de sedimentos (Dunne, 1979; Ludwig & Probst, 1998) y a que además, las relaciones con relieve y área de drenaje son menos acentuadas a esta escala (Pinet & Souriau, 1988; Milliman, 1997).

Con el fin de encontrar un modelo más eficiente al explicar la varianza en la producción de sedimentos, las cuencas tributarias se reagruparon en 2 categorías: alto Magdalena y Magdalena medio. Luego se empleó la rutina de regresión múltiple por etapas en cada una de estas categorías, utilizando datos en bruto y datos con transformación logarítmica. La varianza explicada para el alto y medio Magdalena corresponde al 77% y 75%, respectivamente (Figura 2B, 2C). Estos modelos explican más varianza en la producción de sedimentos en comparación con el modelo general (2). Sin embargo son menos precisos ya que el ECMR es mayor con respecto al ECMR del modelo gene-

ral (Figura 2A, 2B, 2C). Los parámetros que explican la producción de sedimentos en estas categorías son altura media, cociente de relieve y caudal para el Magdalena medio y caudal máximo para el alto Magdalena.

### 3. Evidencias de comportamiento errático en el transporte de sedimentos

En cuencas con áreas de drenaje mayores a 5000 km<sup>2</sup> el efecto de los eventos de alta intensidad en el transporte de sedimentos se enmascara debido al tamaño de la cuenca (i.e. tiempos de residencia mayores, acumulación en zonas de depositación) (Knighton, 1984). El proceso de enmascaramiento es proporcional a la extensión de la cuenca y se considera bajo en cuencas pequeñas (<5000 km<sup>2</sup>) (Trimble, 1977; Reading et al., 1995; Walling & Fang, 2003). Para este análisis se seleccionaron cuencas con áreas de drenaje entre 503 km<sup>2</sup> y 4943 km<sup>2</sup> (Tabla 4) con el objeto de disminuir el efecto de enmascaramiento. En las cuencas analizadas los datos máximos aportan un alto porcentaje de la varianza en las series de transporte de sedimentos (Tabla 4). Los mayores aportes se presentan en los ríos Páez y Guarapas, con el 81% y el 77%, respectivamente, mientras que los menores aportes se dan en los ríos Opón (60%) y Suaza (62%) (Tabla 4).

Cuando los datos máximos son removidos de las series de transporte de sedimentos los promedios interanuales varían (DS<sub>a</sub>) entre el 16% y el 43% (Tabla 4). Además en la mayoría de cuencas, excepto Carare y Opón, el promedio interanual es superado por menos del 30% de los datos de la muestra (Tabla 4). Por ejemplo, el río Negro transporta en promedio 21.8 x 10<sup>3</sup> t d<sup>-1</sup> de sedimentos, valor que sólo es igualado o excedido por el 26% de los datos, y cuando los datos máximos son removidos de la serie el promedio interanual sólo llega a 14.7 x 10<sup>3</sup> t d<sup>-1</sup> de sedimentos (Tabla 4).

El efecto de los datos máximos sobre las series sugiere un comportamiento errático en el transporte de sedimentos, el cual es considerado normal para pequeñas cuencas (<5000 km<sup>2</sup>) ya que su capacidad para enmascarar el efecto de eventos de gran magnitud es baja (Trimble, 1977). Por ende, es factible que una alta proporción de la carga total transportada por el río sea movilizada en cortos períodos de tiempo (Dunne, 1979; Farnsworth & Milliman, 2003). Meade & Parker (1985) señalan que en algunos ríos de Estados Unidos, más de la mitad del sedimento movilizado durante un año es transportado en un período inferior a 10 días. Verstraeten et al. (2003) encontraron en cuencas de España que más del 50% de la producción

**Tabla 4.** Efecto de los datos máximos (d.m.) sobre las series de transporte de sedimentos, expresado como el aporte a la varianza total de la serie (%) y como el cambio en el promedio interanual de transporte cuando los datos máximos son removidos de la serie (ΔS<sub>a</sub>).

Cuenca	Serie de transporte de sedimentos (S <sub>a</sub> )						
	Área (km <sup>2</sup> )	Total datos	Total d.m.	Aporte d.m. a la varianza (%)	S <sub>a</sub> <sup>(1)</sup> (x 10 <sup>3</sup> t d <sup>-1</sup> )	S <sub>a</sub> <sup>(2)</sup> (x 10 <sup>3</sup> t d <sup>-1</sup> )	ΔS <sub>a</sub> (%)
Carare	4,943	168	5	63.4	29.78	25.06	-15.8
Negro	4,604	300	15	71.5	21.83	14.77	-32.3
Páez	4,078	319	5	81.3	8.76	7.21	-17.7
Cabrera	2,446	228	12	64.4	5.05	3.86	-23.5
Opón	1,698	273	14	59.8	9.15	7.40	-19.1
Yaguara	1,386	215	13	72.3	2.23	1.28	-42.6
Suaza	989	240	12	61.8	1.54	1.21	-21.4
Guarapas	503	108	6	77.2	0.18	0.13	-27.7

Nota: Total datos= número total de datos de la serie mensual de transporte de sedimentos.

Total d.m.= número de datos que fueron clasificados como datos máximos en cada serie.

S<sub>a</sub><sup>(1)</sup>= promedio interanual de transporte de sedimentos.

S<sub>a</sub><sup>(2)</sup>= promedio de transporte de sedimentos removiendo los datos máximos.

DS<sub>a</sub>= cambio en el promedio interanual de transporte de sedimentos cuando los datos máximos son removidos de las series y calculado como DS<sub>a</sub> = [(S<sub>a</sub><sup>(2)</sup> - S<sub>a</sub><sup>(1)</sup>)/S<sub>a</sub><sup>(1)]x100.</sup>

de sedimentos, en un período total de tres años, fue causada por sólo tres eventos extremos de precipitación. Es probable que en pequeñas cuencas (<5000 km<sup>2</sup>) los valores de transporte de sedimentos registrados no representen los verdaderos promedios de largo plazo (**Inman & Jenkins**, 1999; **Verstraeten et al.**, 2003).

En un contexto global, se ha señalado que las causas detonantes para eventos extremos de transporte de sedimentos, están constituidas por patrones climáticos de alta intensidad, actividad antrópica concentrada y fenómenos de remoción en masa (**Thomas**, 1994; **Inman & Jenkins**, 1999; **Farnsworth & Milliman**, 2003). Los datos máximos de transporte de sedimentos se presentaron en muy baja proporción durante condiciones extremas de precipitación. En algunos casos, los eventos máximos de transporte de sedimentos se presentan en condiciones de baja precipitación. Por ejemplo, en los ríos Carare y Páez, con precipitaciones mensuales promedio de 165 mm m<sup>-1</sup> y 133 mm m<sup>-1</sup>, respectivamente, una alta proporción de datos máximos de transporte de sedimentos se presentan en meses con precipitaciones inferiores a 100 mm m<sup>-1</sup>. Sin embargo, la información de precipitación utilizada en este análisis sólo hace referencia a la cantidad total de precipitación. Considerando la importancia de las tormentas locales y la fuerte variación espacial de la precipitación, especialmente en zonas de ladera (**Mesa et al.**, 1997), deben estudiarse parámetros como intensidad de la precipitación (mm h<sup>-1</sup>), distribución espacial, número de días de lluvia, a una escala más detallada si se quiere determinar el efecto neto de la precipitación sobre los eventos máximos de transporte de sedimentos.

#### 4. Hipótesis preliminares sobre el efecto antrópico en el transporte de sedimentos de la cuenca del Magdalena

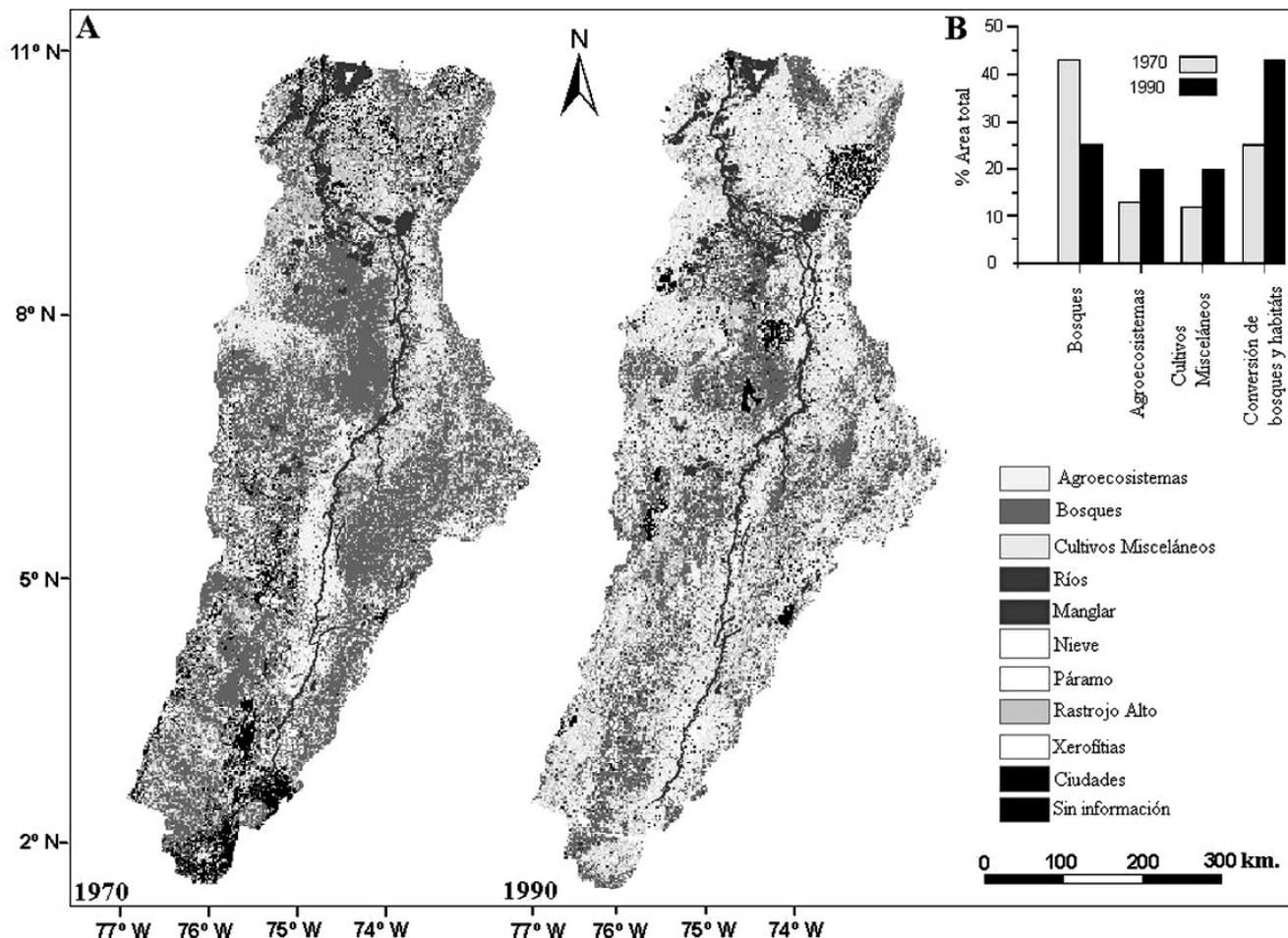
El análisis de cambios en usos del suelo por medio del procesamiento y análisis de imágenes de satélite indica que la cobertura de bosques en la cuenca del Magdalena pasó del 42.6% al 25.4%, entre 1970 y 1990, lo que implica una tasa de deforestación equivalente al 2.01% anual ( $\sim 2.20 \times 10^5$  ha a<sup>-1</sup>) (Figura 4). En este mismo periodo, la extensión de cultivos misceláneos se incrementó en un 8%, mientras que la superficie de agroecosistemas subió en un 7.7%, presentando un incremento combinado del 15.7% (Figura 4). Esto implica que una alta proporción de zonas deforestadas se han destinado para la agricultura y la ganadería.

En los últimos 20 años los agroecosistemas y cultivos misceláneos han tenido un incremento combinado del 14% y 24% en las cuencas del Cauca y Sogamoso, respectivamente. La expansión de la frontera agrícola y ganade-

ra ha significado el descenso de bosques en un 18% en el Cauca y en un 25% en el Sogamoso, y coincide con un aumento del transporte de sedimentos en ambas cuencas (Figura 5). En el Cauca, el promedio de transporte de sedimentos en la década de 1980 era de  $121 \times 10^3$  t d<sup>-1</sup>, en 1990 llegó a  $152 \times 10^3$  t d<sup>-1</sup>, lo que implica un incremento del 26%, mientras que en el Sogamoso el transporte de sedimentos aumentó 2.5 veces en un periodo de 10 años, al pasar de  $13.4 \times 10^3$  t d<sup>-1</sup> en 1989 a  $47.1 \times 10^3$  t d<sup>-1</sup> en 1998 (Figura 5).

La conversión de bosques en pastos para ganadería y zonas agrícolas altera el ciclo hidrológico y modifica las propiedades físicas y químicas del suelo (i.e. contenido de materia orgánica, porosidad, tasa de infiltración), dando como resultado una mayor susceptibilidad a los procesos de erosión (**Bruijnzeel**, 1990). **Walling & Fang** (2003) reportan en Asia incrementos hasta del 80% en el transporte de sedimentos en un periodo de 30 años, como resultado de la deforestación y expansión de la frontera agrícola, y señalan que tales variaciones pueden ser mayores (i.e. 2-5 veces) dependiendo de la litología y condiciones climáticas del área intervenida. Estudios regionales (i.e. **Dunne**, 1979; **Krishnaswamy et al.**, 2001) muestran que existe una relación directa entre el aporte de sedimentos al sistema fluvial y el uso del suelo, la cual se hace más marcada en zonas agrícolas y ganaderas con el aumento de la escorrentía (**Dunne**, 1979).

Los efectos de la conversión de bosques sobre el transporte de sedimentos se reflejan con mayor eficacia en pequeñas cuencas, ya que la proporción de áreas intervenidas con respecto al área de drenaje es alta y existe una menor probabilidad de que los sedimentos sean almacenados dentro de la cuenca (**Walling & Fang**, 2003). En el valle alto del Magdalena los valores bajos de caudal pico de descarga (Tabla 2), que implican descargas máximas muy altas en relación con los caudales promedio, las altas precipitaciones (>2000 mm a<sup>-1</sup>) y las fuertes pendientes indican un comportamiento hidrológico torrencial. En estos sistemas, el tiempo transcurrido entre la meteorización del material y su entrada al sistema fluvial es corto (**Guy**, 1970; **Thomas**, 1994). Por ello es presumible que el incremento en el transporte de sedimentos, que a partir de 1990 se hace notorio en la mayoría de cuencas de esta zona (i.e. Guarapas, Suaza; Páez, Yaguara) (Figura 5), sea causado por la expansión agrícola y ganadera, ya que  $\sim 600 \times 10^3$  ha. de bosques han sido removidas en el alto Magdalena y el Macizo Colombiano desde 1990 (**IDEAM**, 2001) y actualmente la cobertura de bosques sólo llega al 27.3%, mientras que los cultivos misceláneos y agroecosistemas cubren cerca del 50% de la zona.



**Figura 4.** (A) Principales usos del suelo de la cuenca del Magdalena, calculados a partir del procesamiento de imágenes de satélite Landsat de 1970 (MSS) y 1990 (TM); (B) en la margen superior derecha se muestra la extensión de las principales coberturas en cada uno de los dos períodos expresadas como porcentaje del área total de la cuenca (análisis de coberturas modificado de IDEAM, 2001).

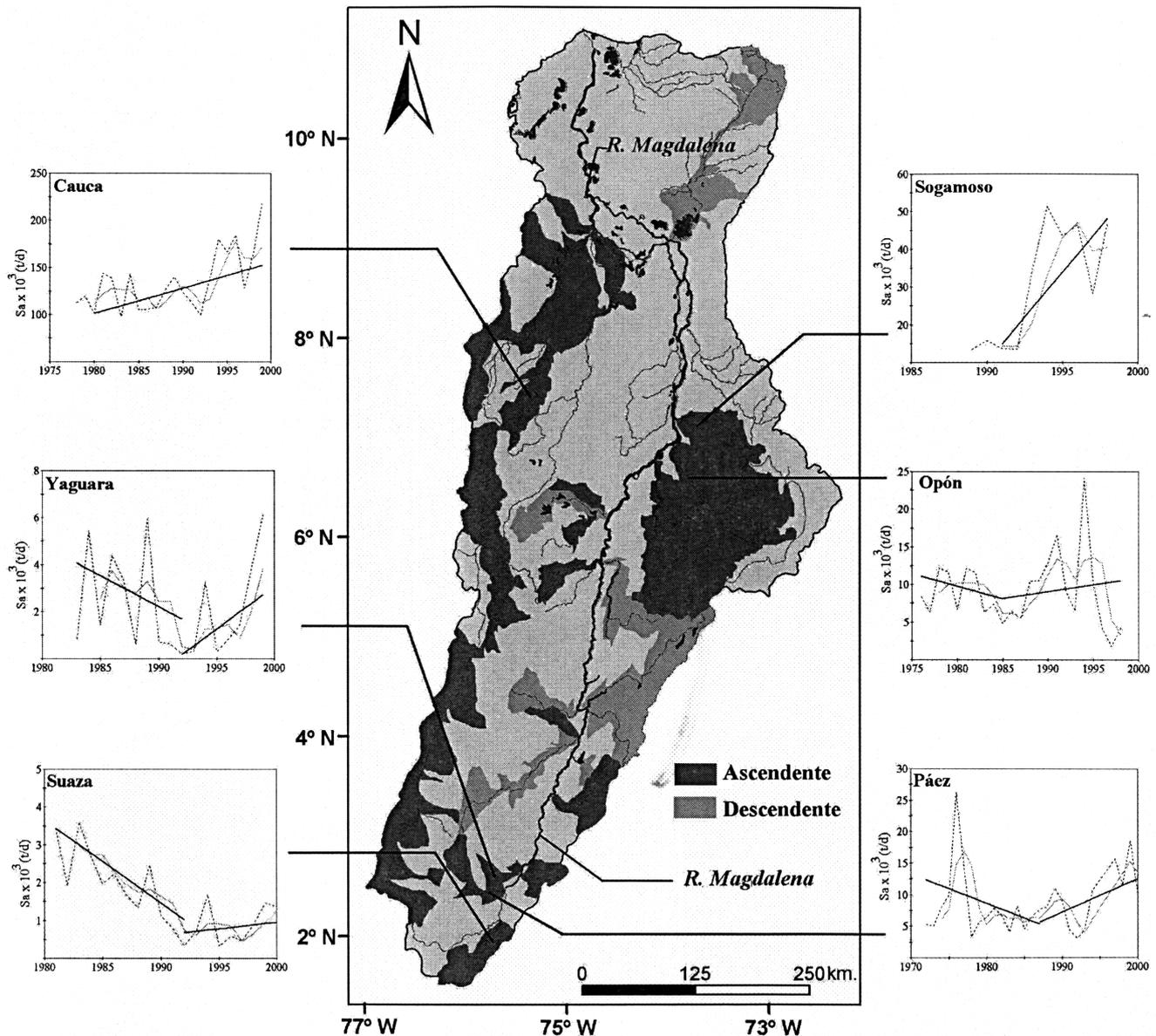
La relación entre deforestación y transporte de sedimentos no es directa (Krishnaswamy et al., 2001; Braud et al., 2001; Costa et al., 2003), ya que el efecto de la deforestación sobre la hidrología de una cuenca, incluyendo transporte de sedimentos, es complejo y depende de múltiples factores como litología, morfología, condiciones de evapotranspiración y precipitación y proporción de área deforestada. Además, los efectos de la conversión de usos del suelo sobre la erosión superficial no siempre son discernibles por medio de la producción de sedimentos, ya que los sitios donde se producen los sedimentos son menores en extensión que los sitios de almacenamiento temporal en pendientes o cauces (Trimble, 1977).

A nivel mundial, la mayoría de ríos no presentan tendencia alguna en lo que respecta al transporte de sedimentos, pero se estima que los países en vía de desarrollo

experimentan tendencias crecientes en el transporte, debido al incremento de procesos erosivos derivados de actividades antrópicas (Walling & Fang, 2003). La expansión de la frontera agrícola, de la frontera ganadera y de la minería, principalmente, han dado lugar a que en el 68% de la cuenca se presenten tendencias positivas en el transporte, mientras que en el 31% se presenten tendencias negativas (Figura 5). Por lo tanto, los procesos erosivos se han incrementado significativamente en la cuenca del Magdalena durante los últimos 20 años.

## Conclusiones

Este estudio analiza los principales factores naturales que controlan la producción de sedimentos en la cuenca del Magdalena y establece hipótesis preliminares sobre la influencia de los procesos no estacionarios de aporte



**Figura 5.** Tendencia con respecto al transporte de sedimentos para las cuencas tributarias estudiadas; las cuencas en gris oscuro muestran incrementos; las cuencas en gris claro presentan descensos en las series de transporte; en las ventanas se presentan series de interés de acuerdo con el objeto de este estudio (Cauca, Opón, Sogamoso, Yaguara, Páez y Suaza); en negro se presenta la línea de tendencia, en gris claro la serie filtrada de datos (media móvil = 3), y la línea punteada negra representa la serie de datos en bruto.

Nota:  $S_a$  = Transporte de sedimentos

de sedimentos (i.e. eventos de alta intensidad, actividad antrópica) en la producción y transporte de sedimentos. La producción de sedimentos en los principales tributarios de segundo orden del río Magdalena varía entre 10 y 2200  $t\ km^{-2}\ a^{-1}$ , con un promedio para toda la cuenca de  $689 \pm 527\ t\ km^{-2}\ a^{-1}$ . De acuerdo con estimaciones globales

de la distribución espacial en la producción de sedimentos, este valor puede catalogarse como alto en un contexto global y es causado, en gran proporción, por la intensa actividad tectónica, los regímenes de precipitación, las condiciones litológicas y los niveles de intervención antrópica que caracterizan la cuenca del Magdalena.

Los análisis de regresión múltiple entre producción de sedimentos y 14 parámetros físicos (morfométricos, topográficos, climáticos e hidrológicos), indican que la escorrentía y el caudal máximo explican el 58% de la varianza en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. Lo anterior resalta la importancia de los procesos de erosión hídrica superficial y de la capacidad fluvial en la producción de sedimentos de la cuenca. En este estudio no se encontraron correlaciones significativas entre producción de sedimentos y área de la cuenca debido a que en cuencas con áreas de drenaje menores a 10000 km<sup>2</sup> estas relaciones son poco acentuadas, y a que además, a esta escala de trabajo las características locales (i.e. régimen de lluvias, cobertura vegetal, litología) tienen mayor peso sobre la producción de sedimentos.

El análisis de regresión múltiple permitió obtener un modelo numérico que describe la producción de sedimentos en términos de la escorrentía (mm a<sup>-1</sup>) y el caudal máximo (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Este modelo, basado en los datos de 26 cuencas tributarias, tiene una eficiencia del 58% (P<0.01) y un ECMR del 11%, lo que indica que el modelo es robusto y preciso en términos estadísticos. Por lo tanto, puede ser utilizado de manera confiable para la estimación de la producción de sedimentos en cuencas tributarias del río Magdalena a partir de datos de escorrentía y caudal máximo. Este tipo de modelos tiene gran aplicabilidad en estudios de navegabilidad en sistemas fluviales, delimitación de zonas críticas de producción de sedimentos, diseño de planes de control de erosión, determinación de vida útil de embalses, entre otros.

En ocho cuencas tributarias, seleccionadas de acuerdo con la tasa de producción de sedimentos y su ubicación geográfica, se determinó que los datos máximos de transporte de sedimentos aportan entre el 60% y el 81% de la varianza en las series interanuales de transporte. Esto señala un comportamiento errático en cuanto al transporte de sedimentos e indica que un alto porcentaje de la carga total transportada es movilizadada en cortos períodos de tiempo. De otro lado, análisis de series de tiempo indican que en el 68% del área de estudio se presentan tendencias ascendentes en el transporte de sedimentos. Los análisis preliminares de cambios de usos del suelo (1970-1990) señalan que estas tendencias podrían relacionarse con la reducción del ~17% de las áreas de bosque y con el incremento del ~16% de las zonas dedicadas a la agricultura y la ganadería. Lo anterior sugiere que las actividades antrópicas han incidido significativamente en los niveles de erosión de la cuenca del Magdalena durante los últimos 20 años.

## Agradecimientos

Este estudio se desarrolló en el marco del Proyecto Magdalena, ejecutado por la Universidad EAFIT-Departamento de Geología con el apoyo financiero de COLCIENCIAS (código 1216-09-12105). Los autores también expresan su agradecimiento a CORMAGDALENA por el apoyo logístico y financiero y al IDEAM por la información suministrada (Convenio marco de cooperación entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y la Universidad EAFIT).

## Bibliografía

- Anhert, F.**, 1970. Functional relationships between denudation, relief, and uplift in large mid-latitude drainage basins. *Am. J. Sci.* **268**: 243-263.
- Bowerman, B., O'Connell, R.**, 1987. *Forecasting and time series: an applied approach.* Duxbury Press, Belmont. 726 p.
- Braud, I., Vich, A., Zuluaga, J., Fornero, L., Pedrani, A.**, 2001. Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modelling. *Journal of Hydrology.* **245**: 124-144.
- Bruijnzeel, L.**, 1990. *Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state of the knowledge.* UNESCO, Paris. 224 p.
- Camilloni, I., Barros, V.**, 2003. Extreme discharge events in the Paraná river and their climate forcing. *Journal of Hydrology.* **278**: 94-106.
- Costa, M., Botta, A., Cardille, J.**, 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins river, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology.* **283**: 206-217.
- Chuvieco, E.**, 2000. *Fundamentos de teledetección espacial.* Rialp S.A., Madrid. 568 p.
- Douglas, I.**, 1967. Man, Vegetation and Sediment Yield of Rivers. *Nature.* **215**: 925-928.
- Dunne, T.**, 1979. Sediment yield and land use in tropical catchments. *Journal of Hydrology.* **42**: 281-300.
- Farnsworth, K., Milliman, J. D.**, 2003. Effects of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers: the Salinas river example. *Global and Planetary Change.* **39**: 53-64.
- Guy, H.**, 1970. *Fluvial sediment concepts.* U.S. Geological Survey. United States Government Printing Office, Denver. 55 p.
- Harrison, C.G.**, 2000. What factors control mechanical erosion rates. *Int. Journal of Earth Sciences.* **88**: 1-11.
- Higgitt, D., Lu, X.**, 2001. Sediment delivery to the Three Gorges: 1. Catchment controls. *Geomorphology.* **41**: 143-156.
- Holeman, J.**, 1968. The sediment yield of major rivers of the world. *Water Resources Research.* **4**: 737-747.
- Hovius, N.**, 1998. Controls on sediment supply by large rivers. *SEPM Special Publication.* **59**: 3-16.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)**, 1998. *El medio ambiente en Colombia.* IDEAM, Bogotá. 495 p.

- IDEAM**, 2001. Estudio ambiental de la cuenca Magdalena – Cauca y elementos para su ordenamiento territorial. (Formato digital)
- IDEAM**, 2003. Datos diarios de caudal, concentración de sedimentos en suspensión y transporte de sedimentos en suspensión para estaciones selectas de la cuenca del Magdalena. (Formato digital)
- Inman, D., Jenkins, S.**, 1999. Climate change and the episodicity of sediment flux of small California rivers. *Journal of Geology*. **107**: 251-270.
- Jansen, J., Painter, R.**, 1974. Predicting sediment yield from climate and topography. *Journal of Hydrology*. **21**: 371-380.
- Knighton, D.**, 1984. Fluvial forms and processes. Chaucer Press, Great Britain. 217 p.
- Krishnaswamy, J., Halpin, D., Ritcher, D.**, 2001. Dynamics of sediment discharge in relation to land-use and hydro-climatology in a humid tropical watershed in Costa Rica. *Journal of Hydrology*. **253**: 91-109.
- Lane, S.N., Richards, K.S., Chandler, J. H.**, 1996. Discharge and sediment supply controls on erosion and deposition in a dynamic alluvial channel. *Geomorphology*. **15**: 1-15.
- Ludwig, W., Probst, J.**, 1998. River sediment discharge to the oceans: present controls and global budgets. *American Journal of Science*. **298**: 265-295.
- Meade, R., Parker, R.**, 1985. Sediments in rivers of the United States. U.S Geological Survey-Water Supply Paper. **2275**: 49-60.
- Mesa, O., Poveda, G., Carvajal, F.**, 1997. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Imprenta de la Universidad Nacional, Bogotá. 390 p.
- Milliman, J.D.**, 1997. Fluvial sediment discharge to the sea and the importance of regional tectonics. In: Ruddiman, W. (ed.). *Tectonic uplift and climate change*. New York, Plenum Press. pp. 239-257.
- Milliman, J. D., Meade, R. H.**, 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*. **91**: 1-21.
- Milliman, J. D., Syvitski, P.M.**, 1992. Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology*. **100**: 525-544.
- Ministerio de Agricultura**, 1977. La erosión de tierras en Colombia. Editorial Stella, Bogotá. 56 p.
- Mojica, J., Franco, R.**, 1992. Estructura y evolución tectónica del valle medio y superior del Magdalena. *Geología Colombiana*. **17**: 41-64
- Montgomery, D., Runger, G.**, 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw-Hill, Mexico D.F. 895 p.
- Petts, G., Foster, I.**, 1985. Rivers and landscapes. Hodder & Stoughton, London. 274 p.
- Pinet, P., Souriau, M.**, 1988. Continental erosion and large-scale relief. *Tectonics*. **7**: 563-582.
- Reading, A., Thompson, R., Millington, A.**, 1995. Humid Tropical Environments. Blackwell Publishers Inc., Oxford. 429 p.
- Restrepo, J. D., Kjerfve, B.**, 2000. Magdalena river: interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*. **235**: 137-149.
- Stallard, R.**, 1988. Weathering and erosion in the humid tropics. In: Lerman, A; Meybeck, M., (eds.). *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles*. Kluwer Academic Publishers. pp. 225-246.
- Syvitski, J., Peckham, S., Hilberman, R., Mulder, T.**, 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology*. **162**: 5-24.
- Summerfield, M.A., Hulton, N.J.**, 1994. Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins. *J. Geophysical Research*. **99**: 13871-13883.
- Thomas, M.**, 1994. Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes. Wiley, Chichester. 460 p.
- Trimble, S.**, 1977. The fallacy of stream equilibrium in contemporary denudation studies. *American Journal of Science*. **277**: 876-887.
- UPME**, 2004. Unidad de Planeación Minero Energética – Sistema de Información Minero Energético de Colombia (SIMEC). <http://www.upme.gov.co/simec>
- VanSickel, J., Beschta, R.L.**, 1983. Supply-based models of suspended sediment transport in streams. *Water Resources Research*. **19**: 768-778.
- Vélez, J., Poveda, G., Mesa, O.**, 2000. Balances hidrológicos de Colombia. En: *Memorias XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Universidad Nacional-Sede Medellín, 2002 (Formato digital).
- Verstraeten, G., Poesen, J.**, 2001. Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. *Geomorphology*. **40**: 123-144.
- Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., Koninckx, X.**, 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology*. **50**: 327-348.
- Walling, D., Fang, D.**, 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*. **39**: 111-126.
- Walling, D., Kleo, A.**, 1979. Sediment yields of rivers in areas of low precipitation: a global view. In: *The hydrology of areas of low precipitation*, Proceedings of the Canberra Symposium, IAHS-AISH Publication. **128**: 479-493.
- Walling, D., Webb, B.**, 1983. Patterns of sediment yield. In: Gregory, K. (ed.). *Background to Paleohydrology*. Wiley. pp. 69-100.
- Wilson, L.**, 1973. Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation. *American Journal of Science*. **273**: 335-349.
- Xu, J., Cheng, D.**, 2002. Relation between the erosion and sedimentation zones in the Yellow river, China. *Geomorphology*. **48**: 365-385.

Recibido el 8 de junio de 2004

Aceptado para su publicación el 4 de noviembre de 2004