

¿QUÉ SE PUEDE DECIR DEL EFECTO DE LA EROSIÓN EN LA CUENCA SOBRE EL RÍO MAGDALENA?. Análisis de la variación temporal de la carga de sedimentos medida en el Río Magdalena (Sector: Puerto Salgar – La Gloria)

Carlos E. Cubillos y Gabriela Forero
*Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos,
Laboratorio de Ensayos Hidráulicos - LEH
Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá
cecubillosp@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 16 de Junio de 2005 / Aceptación: 25 de Agosto de 2005 / Recibida versión final: 26 de Agosto de 2005.

RESUMEN

Comúnmente se escucha decir que la erosión de las cuencas hidrográficas colombianas ha acabado con los ríos que las drenan. Si esta afirmación es cierta, la carga de sedimentos registrada en los cauces debe haberse incrementado con el paso del tiempo. Este trabajo se desarrolló con el objeto de apreciar si en la información registrada existe una tendencia temporal de crecimiento de la carga de sedimentos que pueda darle validez de manera objetiva a tales afirmaciones en el sector Puerto Salgar – La Gloria del río Magdalena.

Con ese propósito se desarrollaron cinco casos de análisis del comportamiento temporal de la carga de sedimentos transportada por el río estimada según la metodología sedimentológica tradicional que parte de los resúmenes de aforos sólidos y las series de caudal medio diario de ocho estaciones hidrométricas del IDEAM (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, cofinanciador del estudio), ubicadas en el sector de estudio.

Basados en los resultados obtenidos se puede decir que no existe evidencia objetiva que sustente esas afirmaciones contundentemente para la cuenca del río Magdalena en el sector estudiado, ya que en la mayoría de casos la carga de sedimentos no registra un aumento apreciable, tendiendo más bien a disminuir ó a permanecer aproximadamente constante en la gran mayoría de estaciones.

PALABRAS CLAVES: Análisis de la Variación Temporal, Carga de Sedimentos, Erosión, Río Magdalena.

ABSTRACT

It has been said that erosion in river basins has been severely increased in Colombian rivers. If this is true, registered sediment discharge must have increased through the years.

The objective of the present work is to analyze available data to search for a progressive tendency of increase in yield in a number of stations along the Puerto Salgar – La Gloria reach in the Magdalena river, to support this belief. For this purpose, the behavior of sediment yield through time, in a number of stations along the reach, was studied, on the basis of five different alternative ways of computing, using information from hydrographic stations operated by IDEAM (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – Project partner).

Based on the results obtained, it may be said that there is not real support to conclude that there is an increasing sediment discharge in the stations along the study reach. In fact, results indicate constant or even decreasing tendencies.

KEY WORDS: Temporal Fluctuation Analysis, Sediment Yield, Erosion, Magdalena River.

1. INTRODUCCIÓN

En el país durante los últimos 20 años se ha incrementado la preocupación por el deterioro de los ríos, afirmándose en ámbitos gubernamentales y entre el público en general que: ... la erosión en la cuenca producida por la intervención humana ha aumentado los sedimentos considerablemente trayendo como consecuencia la reducción de la navegabilidad... ... la sedimentación acabó con la navegabilidad..., ...el río tiene menos agua que antes..., siendo uno de los casos más comentados el del río Magdalena¹.

Si la erosión en la cuenca ha aumentando, tal comportamiento debe verse reflejado en un incremento con el paso del tiempo de la carga de sedimentos en los cauces, en especial en el cauce del río Magdalena. Sin embargo, la experiencia de los investigadores del Grupo GIREH² al estudiar las tendencias de variación de la carga de sedimentos de numerosos ríos colombianos, sugiere que las mediciones sedimentológicas no son concluyentes en ese sentido, por lo que se planteó el interrogante *¿Se puede afirmar a la luz de los registros sedimentológicos y la información de campo que tales afirmaciones son verídicas?, ¿Qué se puede decir realmente del efecto de la erosión en la cuenca del río Magdalena sobre su cauce?*

La Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, debido a su trabajo conjunto con la Corporación Autónoma Regional del río Grande de la Magdalena, CORMAGDALENA, ha venido desarrollando desde el año 2000 el Estudio de Caracterización Hidrosedimentológica del río Magdalena, con el objeto de analizar el comportamiento del río desde el punto de vista hidrológico, morfológico, hidráulico y sedimentológico. Los estudios han establecido, entre otros aspectos, la necesidad de identificar y analizar las tendencias de variación temporal de los caudales líquidos y sólidos que transporta el río para tratar de valorar objetivamente el impacto del deterioro de la erosión en la cuenca y de esta forma, tratar de establecer la veracidad de afirmaciones como las mencionadas anteriormente.

Para indagar al respecto, se realizó un análisis de la variación temporal de la carga de sedimentos³ medida en suspensión del río Magdalena en el Sector Puerto Salgar – La Gloria con la metodología sedimentológica tradicional la cual parte de la información suministrada en los resúmenes de aforos sólidos y las series de caudal medio diario de 8 estaciones hidrométricas del IDEAM ubicadas en el sector de estudio para el periodo 1974-2000.

Después de analizar los resultados obtenidos se puede decir que no existe evidencia objetiva que permita

1. Serrano O. (1986) "... se está fraguando un cambio en el régimen hidrológico del río Magdalena consistente en un incremento de los caudales máximos y un decremento de los caudales de estiaje. La causa de este preocupante fenómeno solo puede atribuirse a la pérdida de la capacidad reguladora de la cuenca, debido a la intervención humana negativa como es la acelerada deforestación y el mal manejo de los suelos...se espera que haya un progresivo aumento del transporte de sedimentos...".

2. GIREH: Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Posgrado en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos, Sede Bogotá.

3. La carga sólida transportada por un río se puede clasificar según su origen, modo de transporte y método de estimación.

Según su origen:

Se denomina "carga de lavado" al material sólido de la corriente suministrado por la erosión y posterior lavado de la cuenca. Dado su pequeño tamaño, dichos materiales no se encuentran suficientemente representados en el material del lecho debido a que su transporte se realiza en suspensión. La disponibilidad de la carga de lavado está dada por el aporte de la cuenca y por tanto no es función de las características hidráulicas del flujo en la corriente, y su estimación sólo se puede hacer realizando mediciones en la propia corriente, denominadas comúnmente aforos sólidos.

La carga del material del lecho corresponde al material proveniente del fondo del cauce que es transportado por arrastre y en suspensión

por la corriente de acuerdo con la energía del flujo. Actualmente no existe una tecnología adecuada para su medición.

Según su modo de transporte:

El transporte de las partículas de sedimentos se efectúa básicamente por suspensión o por arrastre, dependiendo del peso y tamaño de las partículas, y de la intensidad de la turbulencia del flujo. Los sedimentos más finos se mueven predominantemente en suspensión mientras que los más gruesos se mueven por arrastre. En el modo de arrastre, el peso de las partículas es sustentado por el propio lecho la mayor parte del tiempo.

Según su método de estimación:

* Carga medida: La carga de sedimentos en suspensión se puede medir debido al movimiento simultáneo de las partículas con el flujo, por esta razón se pueden tomar muestras de agua con sedimentos para establecer la concentración media que pasa por una sección. Debido a esto, se emplea el término: "carga medida" para referirse a la cantidad de sedimentos que transitan en suspensión por encima del nivel más bajo de muestreo.

* Carga calculada: Como los sedimentos de material del lecho se mueven de acuerdo con las condiciones locales del flujo en el río, es posible realizar una estimación matemática de la carga que es capaz de transportar la corriente con un adecuado conocimiento de dichas condiciones locales, de tal forma que cuando se emplea el término "carga calculada" se hace referencia a la carga de material del lecho. En el presente trabajo únicamente se analiza la carga medida.

sustentar tales afirmaciones de manera contundente para la cuenca del río Magdalena en el Sector Puerto Salgar – La Gloria, ya que en la mayoría de casos la carga de sedimentos no registra un aumento apreciable, tendiendo más bien a disminuir ó a permanecer aproximadamente constante en la gran mayoría de estaciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo tiene por objeto estudiar las tendencias de variación temporal de los caudales sólidos medios anuales correspondientes a la “carga sólida medida”⁴ en el río Magdalena en el sector Puerto Salgar–La Gloria, a través de la metodología de análisis sedimentológico tradicional, como una alternativa para valorar objetivamente el impacto de la erosión en la cuenca por la intervención humana y su efecto sobre el río.

Los análisis realizados en este trabajo parten de los registros de caudales líquidos medios diarios depurados y analizados por Pabón (2003) y de los aforos sólidos detallados suministrados por el IDEAM en 8 de sus estaciones hidrométricas sobre el río en el tramo de estudio, para emplearlos posteriormente, como insumo de la metodología tradicional para la determinación de cargas anuales de sedimentos.

Es conocido que la morfología de un cauce aluvial es gobernada por el balance sedimentológico que actúa en cada sección transversal. En dicho balance intervienen el Abastecimiento Sólido (o aporte sedimentológico de la cuenca y el cauce hasta la sección objeto de estudio), y la Capacidad de Transporte de sedimentos en el propio cauce (que depende de las características locales del flujo en la sección). Cuando el Abastecimiento es mayor que la Capacidad de Transporte se produce depositación en el lecho, en el caso contrario se producirá socavación.

En este análisis, la información utilizada corresponde a la carga medida⁵, que en su mayor parte está constituida por la carga de lavado como lo demostró Cubillos (1989),

la cual, por el reducido tamaño de las partículas sólidas que la componen, permite razonablemente suponer que un río como el Magdalena en el sector de estudio posee la suficiente capacidad para transportar la carga aportada por la cuenca, de manera tal que bajo este supuesto la carga medida ha de coincidir con el abastecimiento sólido resultante de la erosión en la cuenca. Esta suposición sólo se podría verificar de manera objetiva a partir de mediciones precisas, frecuentes y representativas de un largo periodo, de la configuración y elevación del lecho en las diferentes secciones del río, información ésta que es muy escasa y en ocasiones inexistente en nuestro país.

2.1. Descripción de la zona de estudio.

La zona de estudio se ilustra en la Figura 1, abarca 467 Km de longitud del río Magdalena en el sector Puerto Salgar -La Gloria y cuenta con un área de drenaje hasta la estación Puerto Salgar de 56.765 Km², y de 133.765 Km² en Peñoncito.

En el sector se encuentran ubicados a la orilla del río los municipios de La Dorada, Puerto Boyacá, Puerto Inmarco, Puerto Berrio, Barrancabermeja, Puerto Wilches y La Gloria. Entre los tributarios más importantes del río están, por la margen izquierda los ríos Pontoná, La Miel, Nare, Caño Balcanes, Quebrada Santa Cruz, y los Ríos Pescado, San Bartolomé y Cimitarra; por la margen derecha aportan sus aguas los ríos Negro, Velásquez, Palagua, Ermitaño, Caño Baúl, y los Ríos Carare, Opón, Sogamoso y Lebrija. En el Magdalena Medio existe un gran número de ciénagas y dos brazos que bifurcan el río entre Badillo y La Gloria como se puede apreciar en la Figura 1.

Para el estudio se seleccionaron 8 estaciones del IDEAM indicadas en la Figura 1, por contar con la mayor cantidad de información hidrosedimentológica en el sector, la cuales se renombraron con el objeto de facilitar la lectura e interpretación de algunas figuras contenidas en el artículo como se ilustra en la Tabla 1.

4. En este trabajo únicamente se analiza la carga medida.

5. De acuerdo con la tecnología convencional mundialmente establecida y utilizada por el IDEAM.

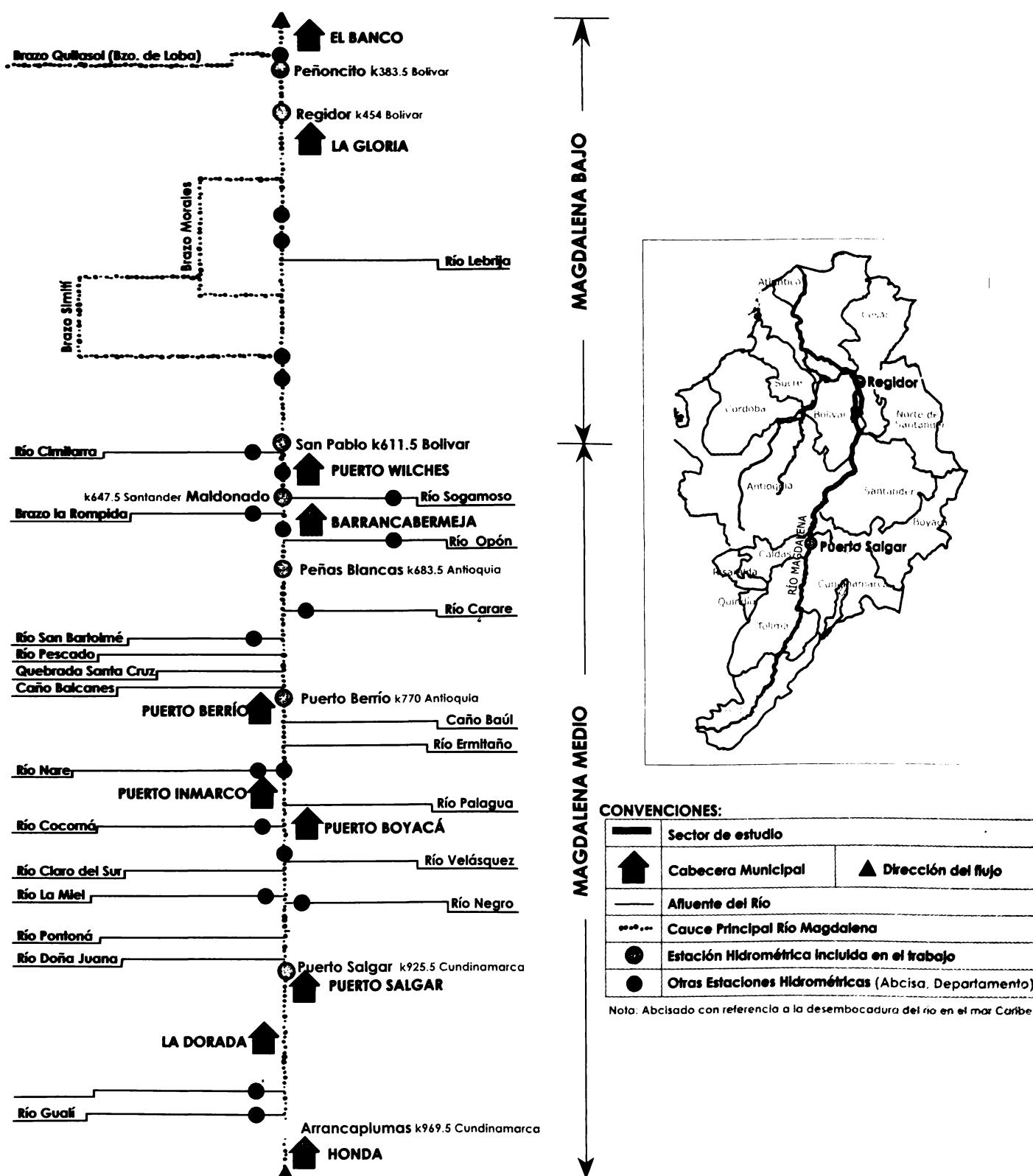


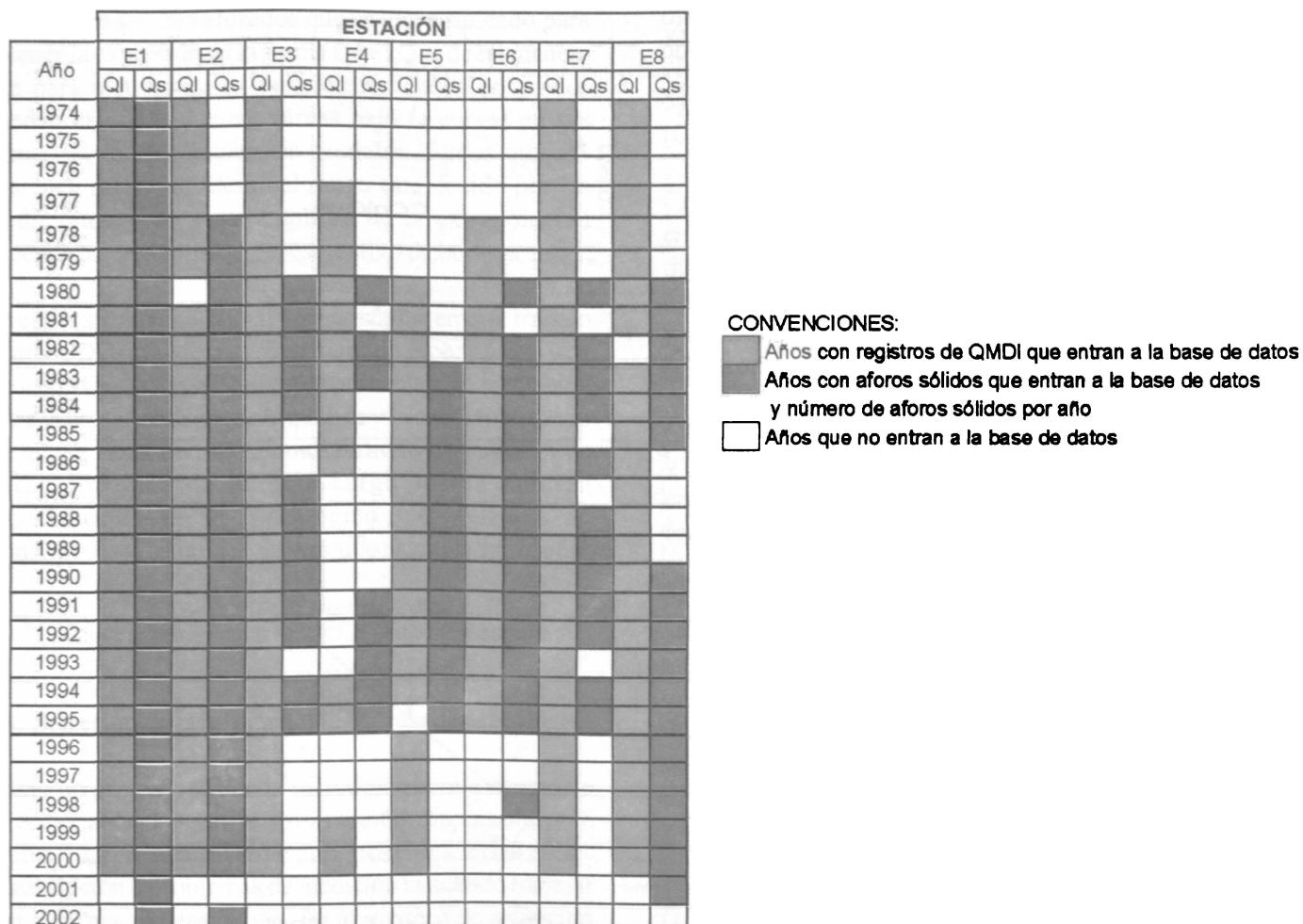
FIGURA 1. Esquema de la ubicación de los municipios, afluentes principales, brazos y estaciones hidrométricas del IDEAM en el tramo de estudio, de las estaciones seleccionadas para el análisis, y localización general.

¿Qué se puede decir del efecto de la erosión en la cuenca sobre el Río Magdalena?. Análisis de la variación temporal de la carga de sedimentos medida en el Río Magdalena (Sector: Puerto Salgar – La Gloria) - Cubillos y Forero.

TABLA 1. Estaciones utilizadas en el análisis.

NOMBRE	CLAVE	CÓDIGO IDEAM	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	No. AFOROS SÓLIDOS
Arrancapumas	E1	2123702	Guaduas	Cundinamarca	125
Puerto Salgar	E2	2303701	Puerto Salgar	Cundinamarca	55
Puerto Berrio	E3	2309703	Puerto Berrio	Antioquia	40
Peñas Blancas	E4	2316701	Yondó	Antioquia	17
Maldonado	E5	2315708	Barrancabermeja	Santander	37
San Pablo	E6	2320704	San Pablo	Bolívar	55
Regidor	E7	2502741	Regidor	Bolívar	43
Peñoncito	E8	2502733	El Peñón	Bolívar	45
TOTAL					417

TABLA 1. Años con registro de Caudal Medio Diario y de Aforos Sólidos disponibles en las ocho estaciones incluidas en el estudio.



2.2. Metodología

Para determinar la magnitud de la carga anual de sedimentos medida en suspensión, se empleó la metodología tradicional consistente en la determinación del área bajo la curva de Duración de Carga Sólida Medida (CDQSm), la cual a su vez se obtiene a partir de la Curva de Calibración de Carga Sólida Medida (CCalQsm) y la Curva de Duración de Caudales Líquidos (CDQl) en cada una de las estaciones hidrométricas consideradas en el análisis.

Las curvas de calibración de carga medida se obtienen a partir de una regresión potencial entre los caudales líquidos y los caudales sólidos medidos resultantes de los aforos sólidos detallados. Estas relaciones se pueden calcular para diferentes períodos de agregación de los datos; en este caso, se han hecho para todo el registro (27 años de datos), por décadas y año por año definiendo así los diferentes escenarios de estudio.

La aplicación de la metodología para idénticos períodos de agregación en todas las estaciones permite analizar la variación de las cargas sedimentológicas medias anuales para esos mismos períodos, de tal manera que al comparar los valores resultantes de la carga anual así estimados es posible apreciar tendencias temporales de variación de los diferentes parámetros.

La metodología sugerida por Carl (1951) para determinar la Curva de Duración de Carga Sólida Medida (CDQSm) para una determinada estación, consiste en aplicar la Curva de Calibración de Carga Sólida Medida (CCalQsm) a cada uno de los Caudales Medios Diarios (QMD) que conforman la Curva de Duración de Caudales Líquidos (CDQl)⁶, obteniendo para cada QMD su correspondiente valor de carga de sedimentos y % de tiempo según se ilustra en la Figura 2.

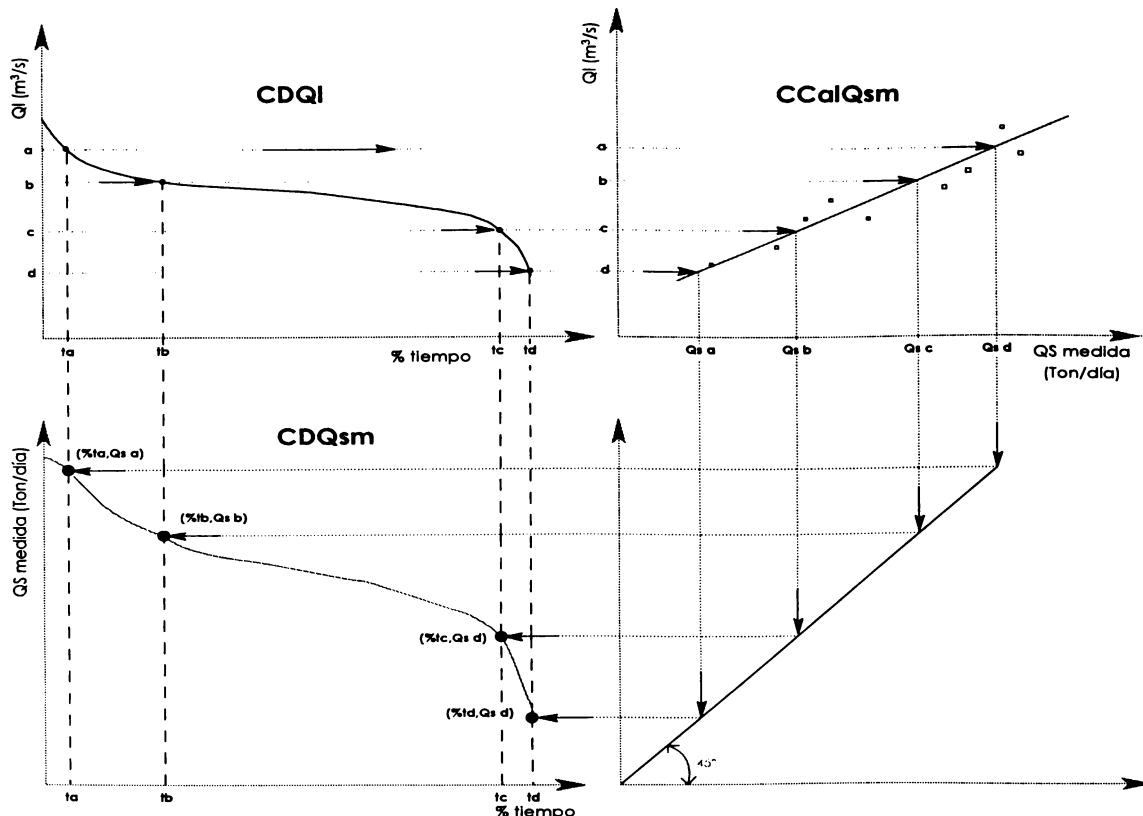


FIGURA 1. Esquema del procedimiento empleado para obtener una CDQsm a partir de la CDQl y la CCalQsm.

6. En aquellas estaciones donde las series de QMDl no eran continuas, se extendieron sus CDQl al periodo base (27 años), a partir del método de la estación índice propuesto por Sercy, el cual parte de la serie de registros coincidente entre una estación base de periodo largo y una

incompleta (de periodo corto), y del registro completo de la estación base, para determinar así la respectiva CDQ de la estación considerada incompleta extendida al periodo de la estación base.

Ya que la CDQl es una curva de frecuencia acumulada, a cada uno de los QMD tomados en el cálculo le corresponde un % de tiempo determinado, y por lo tanto a su correspondiente carga de sedimentos, calculada por el procedimiento mencionado, le corresponde el mismo % de tiempo; obteniéndose de esta manera la Curva de Duración de Carga Sólida Medida (CDQsm), de cuya integración se obtiene el transporte medio anual de sedimentos; valor que se interpreta como la cantidad promedio anual de sedimentos que transporta la corriente, en términos de peso seco por unidad de tiempo (Ton/año).

Se considera que la confiabilidad de una Curva de Duración de Carga Sólida Medida (CDQsm), depende del rango de aplicabilidad de la Curva de Calibración de Carga Sólida Medida (CCalQsm) empleada en su estimación, es decir, de los valores máximos y mínimos de caudales sólidos aforados que se han empleado para obtener la expresión de la forma $Q_s = kQ_l^n$; de tal manera que para una curva de duración de Caudales sólidos pueden existir dos zonas (áreas bajo la curva) en sus extremos, en las cuales los caudales sólidos que allí aparecen están por fuera del rango establecido por las mediciones, y de cuya amplitud de la extrapolación depende la confiabilidad del estimativo de la carga anual.

En el desarrollo de los análisis realizados en este trabajo a cada CDQsm se le han discriminado dichas áreas y se ha determinado su proporción en porcentaje de la relación entre la carga efectivamente medida y la carga total como un índice de la certeza o confiabilidad de la curva de duración obtenida para la carga sólida medida representada en el parámetro GC (Grado de Confiabilidad), el cual se ha definido según la expresión:

$$GC (\%) = \frac{Carga Efectivamente Medida}{Carga Efectivamente Medida + Carga Extrapolada} \times 100$$

2.3. Selección de la información hidrosedimentológica

Como un primer paso de la metodología, fue necesario seleccionar y depurar la información disponible para identificar los registros con posibles errores de transcripción o problemas de medición buscando trabajar con información confiable. En el proceso de selección se examinaron las series de QMDI bajo 3 criterios de análisis, y las de aforos sólidos bajo otros 4 criterios, los cuales se listan a continuación y se encuentran explicados detalladamente en Forero y Cubillos (2004):

- **Para las series de caudales líquidos medios diarios:**

Criterio 1: Se aceptan en la base de datos aquellos años incompletos que cuentan con más del 95% de los registros diarios (>347).

Criterio 2: Se rechazan aquellos años con menos del 70% de los registros (256).

Criterio 3: Se rechazan aquellos años con datos entre el 70 y 95%, cuyo valor de caudal medio anual está por fuera del rango de más o menos una desviación estándar alrededor de la media anual multianual de la estación, calculada teniendo en cuenta únicamente los registros de los años ya aceptados.

- **Para los registros de aforos sólidos:**

Los criterios de selección de los aforos sólidos se basan en la verificación de la coherencia en los valores de las variables hidráulicas reportadas en cada registro del “Resumen de Aforos Sólidos” del IDEAM (Criterios 4 y 5), y en los parámetros sedimentológicos reportados (Criterios 6 y 7), así:

Criterio 4: Similitud entre los caudales líquidos medidos en el aforo y los reportados en el registro de caudal medio diario para las mismas fechas. Si existe una diferencia mayor al 15%, se investiga la posible causa de la misma y se continúa con el proceso de verificación; de lo contrario se acepta el aforo en la base de datos.

Criterio 5: Similitud entre el caudal líquido aforado, Q_{la} , y el promedio de los caudales medios diarios correspondientes a tres días sucesivos alrededor de la fecha de realización del aforo. Específicamente, en los aforos en que la diferencia según el Criterio 4 se encuentra entre el 15% y el 90%, se aplica el Criterio 5 en el cual se rechazan los aforos cuya diferencia sea mayor al 60% en la comparación con el promedio de tres días.

Criterio 6: Verificación de la coherencia entre la concentración y los demás parámetros reportados en cada aforo sólido. Se verifica el valor de la concentración media reportada con la media calculada como el cociente entre el caudal sólido y el caudal líquido aforados, si la diferencia entre esos dos valores es mayor al 10%, el dato se excluye, o de lo contrario se acepta.

Criterio 7: Verificación del valor reportado de la concentración superficial como función de la concentración media.

Es importante anotar la falta de continuidad en los registros de caudal medio diario y el reducido número de aforos sólidos disponibles en casi todas las estaciones hidrométricas, como se puede apreciar en las Tablas 1 y 2. Se advierte, además, cierta irregularidad en la periodicidad de la toma de datos sedimentológicos

(realización de aforos), llamando la atención, de manera preocupante, que desde el año 1995 hasta la fecha no se han efectuado mediciones en 5 de las estaciones analizadas, y para aquellos años en los cuales se cuenta con aforos, se tienen en promedio 3 aforos por año como se ilustra en la Tabla 3.

TABLA 3. Años con registro de Caudal Medio Diario y de Aforos Sólidos disponibles en las ocho estaciones incluidas en el estudio luego del proceso de depuración de la información.

Año	ESTACIÓN															
	E1		E2		E3		E4		E5		E6		E7		E8	
	Ql	Qs	Ql	Qs	Ql	Qs	Ql	Qs	Ql	Qs	Ql	Qs	Ql	Qs	Ql	Qs
1974	16															
1975	18															
1976	26															
1977	9															
1978	5	1														
1979	4	3														
1980	4		3	1							3	3		4		
1981	1	1												2		
1982	3	2	2		1						1	2		2		
1983	5	4	5	3							4	5		5		
1984	5	3	5						4		5	5		6		
1985	4	4						2	2					3		
1986	1	3							1	1	1					
1987	4	5	1					1		1						
1988	2	2	5					5		5	5					
1989	2	2	5					5		5	5					
1990	4	3	4					5		6	5			2		
1991	2	1	4	2				4		5	5			2		
1992	2	1	5	6				5		8	5			4		
1993	1	2		1				1	1	2				2		
1994		2		1	1			1	1	1	1			2		
1995		1		2	3	3		3		5	1			2		
1996	1	2												1		
1997	1	1												2		
1998	2	5									1			3		
1999	1	3												2		
2000	2	1												1		
No. De Años de registro	27	25	26	23	26	12	7	7	13	12	11	15	17	12	24	16

CONVENCIONES:

- Años con registros de QMDI que entran a la base de datos
- Años con aforos sólidos que entran a la base de datos y número de aforos sólidos por año
- Años que no entran a la base de datos

2.3.1. Escenarios de Análisis

Para evaluar las tendencias de variación temporal de las cargas sedimentológicas anuales se definieron 5 escenarios o casos de análisis, y se desarrolló un caso adicional (Caso 6) como una alternativa para proponer el mejor uso de la información sedimentológica disponible, los cuales se presentan resumidos en la Tabla 4 donde se indica su denominación (número) y título

(nombre), objeto de estudio y nivel de agregación de la información.

Como se señala en la Tabla 4, el primer caso de análisis sirve como patrón de referencia para los casos 2, 3, 4, y 5, ya que representa las condiciones promedio durante los 27 años de estudio, es decir, el comportamiento promedio multianual.

TABLA 4. Relación detallada de las características principales de cada uno de los escenarios o casos de análisis incluidos en el trabajo.

CASO	NOMBRE	OBJETO	TIPO DE AGREGACIÓN DE LA INFORMACIÓN
1	Estimación de la carga promedio anual multianual a partir de CCaQsm y CDQI para la totalidad de los registros	Describir el comportamiento promedio multianual en la estación. La tendencia general que ha tenido cada una de las estaciones durante los 27 años de registro disponible	CCaQsm obtenida de la regresión potencial con todos los aforos disponibles en el registro y su respectiva CDQI obtenido para el periodo completo de análisis en cada estación
2	Estimación de las cargas anuales a partir de la CDQI del mismo año y la CCaQsm de la totalidad del periodo	Tiene como hipótesis que la CCaQsm obtenida con todos los aforos sólidos del registro, representa adecuadamente el comportamiento típico anual, de tal manera que las diferencias que se obtienen en la estimación de la carga anual, corresponden únicamente a las variaciones anuales del régimen hidrológico.	Aplicar la CCaQsm de la totalidad del periodo de registro (27 años) a la CDQI correspondiente a cada año, en cada estación.
3	Estimación de la carga promedio anual a nivel decadal, a partir de las CCaQsm y CDQI correspondientes	Identificar las tendencias generales de comportamiento con el paso del tiempo discriminado por décadas.	Aforos sólidos disponibles agregados por décadas para obtener las CCaQsm para los años 70, 80 y 90; y registros de QMD agrupados de igual manera.
4	Estimación de las cargas anuales a partir de las relaciones CCaQsm y CDQI para cada año	Identificar qué tanto varían las cargas anuales obtenidas a partir de los datos del mismo año y por comparación con los resultados del caso 2 examinar qué tan valedera es una CCaQsm agrupando todos los aforos disponibles para ilustrar el comportamiento medio anual.	Las CCaQsm anuales para aquellos años en los cuales se tienen más de tres mediciones de aforo.
5	Estimación de la carga media anual para períodos definidos según la ocurrencia de las fases del Fenómeno ENSO	Examinar la posible incidencia de las fases del fenómeno ENSO, Fenómenos: Niño y Niña	CCaQsm agrupando todos los aforos sólidos según períodos niño, niña y normal utilizando la CDQI media multianual (27 años).
6	Estimación de cargas medias anuales multianuales con información sedimentológica incremental	Estudiar el efecto de contar con un mayor número de aforos sólidos en cada estación.	Obtener diferentes CCaQsm incrementando el número de aforos sucesivamente cada 5 aforos dejando fija la CDQI promedio de todo el periodo (27 años).
7	Estimación de la carga promedio anual multianual a partir de CCaQsm para grupos de estaciones	Analizar si al agrupar los registros se mejora el G.C. de la estimación, y verificar si este procedimiento se puede emplear generalizar para algunas estaciones que tendrían que ser prácticamente descartadas de la mayoría de análisis por contar con información escasa	Se agrupan los aforos sólidos según las estaciones que presentan CCaQsm similares, de acuerdo con las apreciaciones de los resultados de los otros casos, y se aplican las CCaQsm por sectores a cada una de las CDQI de los 27 años en las estaciones correspondientes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las tendencias de variación encontradas en los diferentes casos se presentan a continuación y se comparan posteriormente entre sí para dar respuesta al interrogante planteado inicialmente.

3.1. Caso 1: Estimación de la carga promedio a partir de CCaQsm y CDQI para la totalidad del periodo de registro

El primer caso muestra las condiciones promedio del periodo 1974-2000 permitiendo apreciar la variación espacial de la carga de sedimentos y de los caudales líquidos promedio multianuales. A partir de los resultados de este caso se puede decir que se presenta un aumento

del caudal líquido en dirección hacia la desembocadura del río en el tramo Arrancaplumas – Regidor (Figura 3-a) exceptuando el sector de la estación Peñoncito; de igual forma, la carga medida de sedimentos presenta una

tendencia de crecimiento hacia aguas abajo (Figura 3-b) exceptuando el tramo Arrancaplumas – Puerto Berrio, pareciendo coincidir con el cambio morfológico del Magdalena Medio al bajo Magdalena.

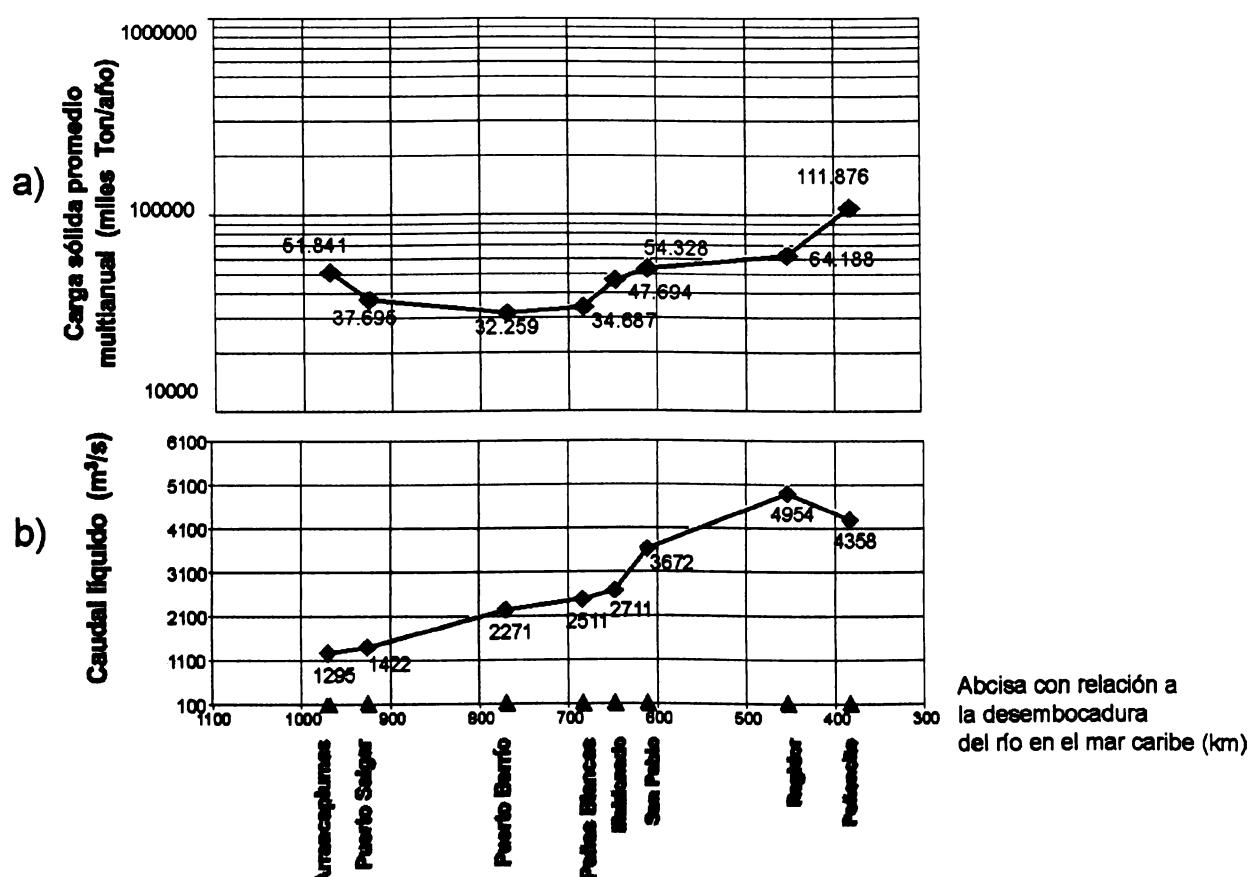


FIGURA 3. Variación espacial de la carga sólida medida promedio anual (a) y del caudal líquido promedio anual (b) en las 8 estaciones hidrométricas a lo largo del sector de estudio.

Continuando el recorrido del río hacia su desembocadura presenta aumento de la carga de sedimentos cercano al 40% al recibir los afluentes Sogamoso y Opón ubicados entre las estaciones Peñas Blancas y San Pablo, así mismo se nota como ésta aumenta casi un 75% al llegar a la estación Peñoncito.

El grado de confiabilidad GC obtenido en la estimación de las cargas oscila entre el 99% y el 83% lo cual muestra que la CCalQsm con todos los registros disponibles permite estimar las cargas de sedimentos que se presentan en los rangos de variación típicos de cada una de las

estaciones, aunque al analizar los valores máximos no logre representar adecuadamente su comportamiento debido a la falta de mediciones sedimentológicas en ese rango.

3.2. Caso 2: Estimación de la carga promedio anual a partir de CCalQsm de la totalidad del periodo con CDQl anual.

Con el objeto de apreciar las tendencias de variación temporal se realizaron regresiones lineales de los caudales líquidos promedio anual y de la carga sólida promedio anual como se muestra en la Figura 4.

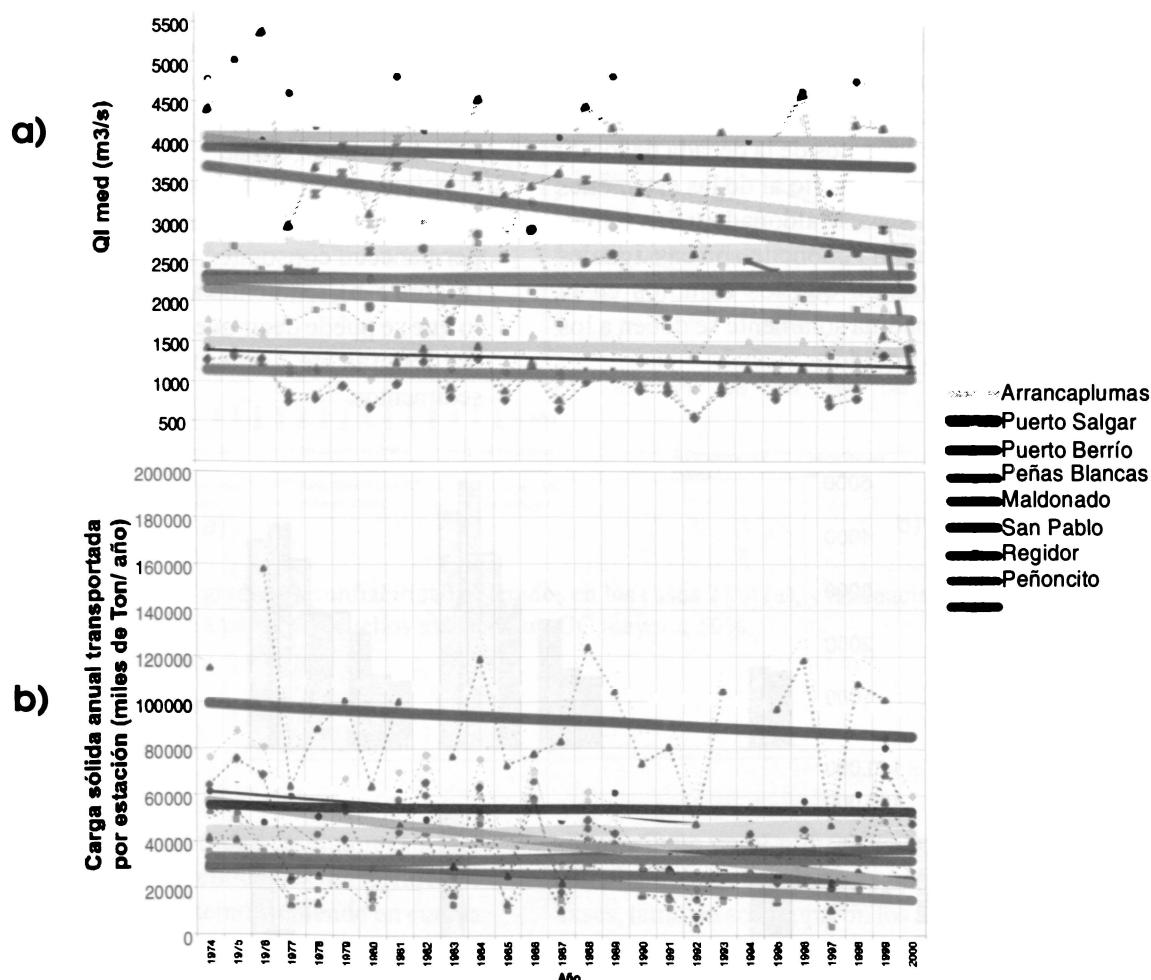


FIGURA 4. Tendencias temporales de variación de la carga sólida anual y el caudal líquido promedio anual en las 8 estaciones hidrométricas para el caso 2.

Los valores de las cargas anuales de sedimentos resultantes de aplicar la CCalQsm multianual a cada una de las CDQl anuales, muestran una tendencia hacia la reducción durante los 27 años del estudio en todas las estaciones concordando con el decrecimiento que se observa en los caudales líquidos medios anuales (ver Figura 4-a y 4-b).

Al comparar los resultados obtenidos en este caso con los del Caso 1, para los años de caudales líquidos altos, la carga de sedimentos anual varía entre el 20% y el 90% por encima de la carga media multianual, mientras que para los caudales líquidos medios anuales bajos es inferior, oscilando entre el 40% y el 20% de dicha media. El G.C. en la estimación de los años con Ql altos oscila entre el 65%-85% mientras que para los años de Ql bajos son cercanos al 92%. Para el periodo 1990-1997 la

confiabilidad en la estimación de la carga es bastante alta en todas las estaciones lo cual lleva a sugerir que para ese periodo la CCalQsm multianual es bastante representativa de las condiciones de variación de QMDl promedio de las 8 estaciones consideradas en el estudio. Entre ellas Peñas Blancas es la estación con menores grados de confiabilidad ya que únicamente en 2 años presentó G.C. mayores al 90%, seguida por Maldonado y San Pablo.

3.3. Caso 3: Estimación de la carga promedio anual a nivel decadal, a partir de las CCalQsm y CDQl para el mismo periodo.

Para este caso se pudo establecer la CCalQsm de la década de los 70 de las estaciones Arrancaplumas y Puerto Salgar, mientras que para las décadas de los 80 y

90 se dispuso de CCaQsm en todas las estaciones dada la información disponible. Al graficar las CCaQsm decadales se encontró que las estaciones Arrancaplumas, Puerto Salgar y Peñoncito muestran una disminución gradual de la carga de sedimentos de la década de los 70 a los 90, comportamiento contrario al de las estaciones Puerto Berrio, Peñas Blancas, Maldonado y San Pablo. Las CCaQsm de la estación Peñoncito son casi iguales para los 80 y 90 mostrando que los cambios en la estimación de la carga medida solamente se deben a los cambios de los caudales líquidos.

Los caudales líquidos anuales promedio por década en todas las estaciones tienden a disminuir coincidiendo con las observaciones hechas en el análisis del caso 2 para todo el periodo como se puede apreciar en la Figura 5-a. Sin embargo la carga de sedimentos disminuye en las estaciones Arrancaplumas, Puerto Salgar y Peñoncito (las que cuentan con mayor cantidad de información), permanecen constantes en Maldonado y Puerto Berrio (Figura 5-b), tendiendo a aumentar en las restantes. Por lo que se puede decir que de las 8 estaciones 3 presentan tendencias de aumento temporal de la carga de sedimentos.

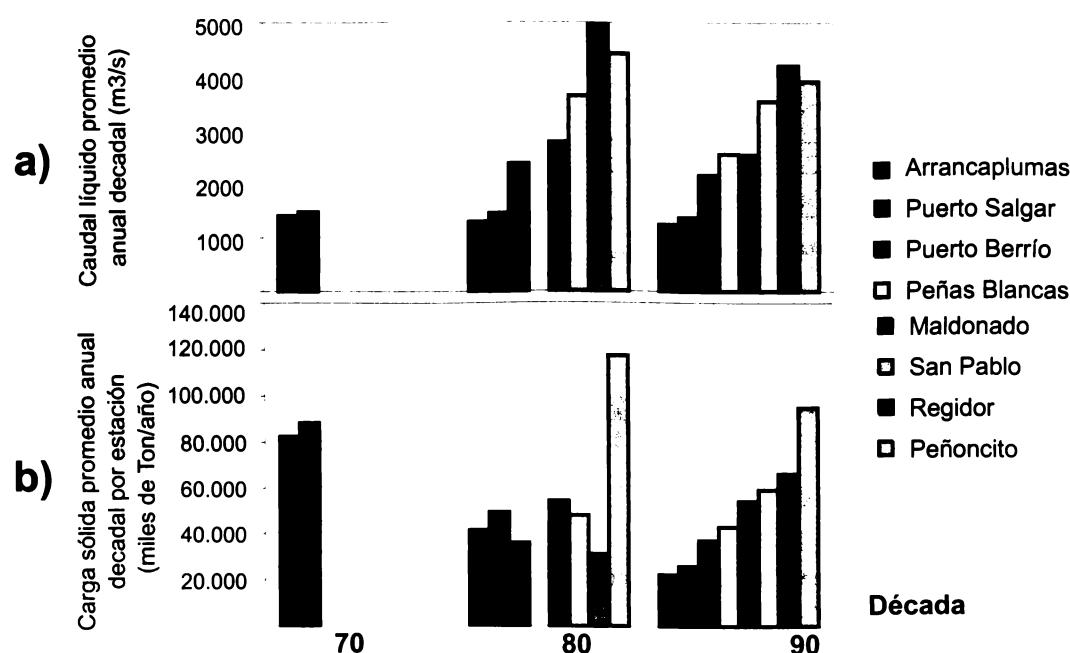


FIGURA 5. Variación temporal del caudal líquido promedio anual decadal (a), la carga sólida promedio anual decadal (b) y el grado de confiabilidad para el caso 3.

3.4. Caso 4: Estimación de la carga anual a partir de las relaciones CCaQsm y CDQI para el mismo año

Como el objeto de estudio de este caso es apreciar la variación para cada año de la carga de sedimentos estimada a partir de los propios datos, en la Figura 6-a se grafican simultáneamente los grados de confiabilidad de los casos 2 y 4 donde se puede ver cómo el G.C. de las

cargas estimadas con los datos propios del año disminuye considerablemente en todas las estaciones respecto a los obtenidos en el caso 2, lo que implica que al considerar la CCaQsm como representativa de todo el periodo y estimar a partir de ella los valores de carga de sedimentos hace que mejore el grado de confiabilidad al aumentar la probabilidad de encontrar aforos sólidos efectuados en condiciones extremas (sequía o época de lluvia).

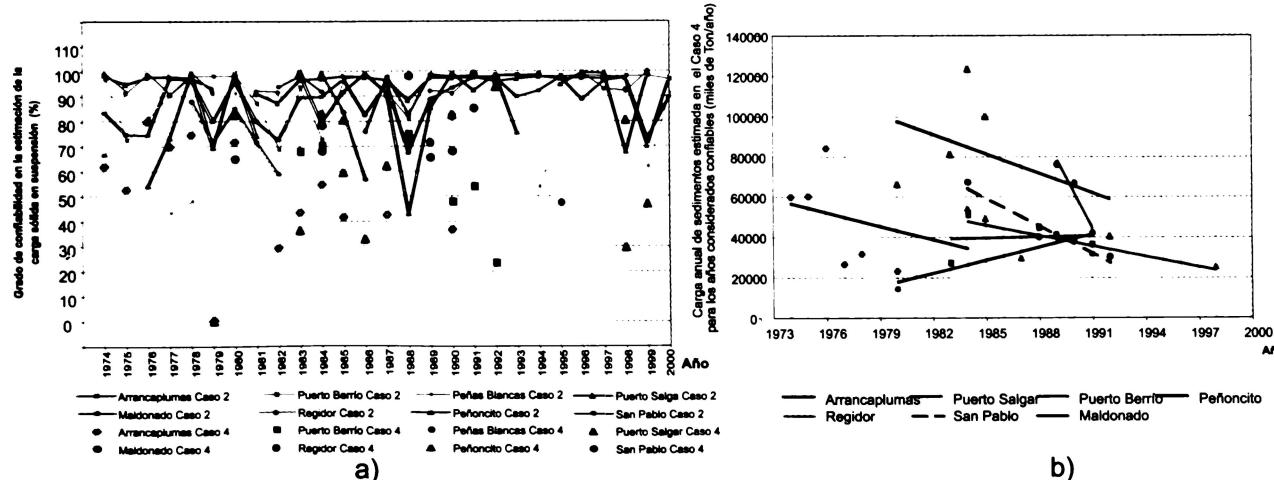


FIGURA 6. Comparación de los grados de confiabilidad obtenidos en los casos 2 y 4 (a), y tendencias de la variación temporal del caso 4 obtenidas a partir de aquellos años con un GC mayor a 50%.

Por los bajos grados de confiabilidad resultantes de este caso fue necesario obtener las tendencias temporales de la variación de la carga de sedimentos teniendo en cuenta únicamente aquellos años con G.C. mayores al 50%, las cuales se presentan en la Figura 6-b. A pesar de que las tendencias de variación así obtenidas cubren unos pocos años de registro, se puede ver en la figura una disminución de la carga de sedimentos en 5 de las 8 estaciones estudiadas, mientras que únicamente en la estación Maldonado se presenta un aumento de la carga de sedimentos, mientras que en Puerto Berrio tiende a permanecer constante, lo cual pone de presente que los resultados obtenidos al aplicar el método año por año no se obtienen resultados confiables, siendo conveniente agrupar la información de los aforos sólidos en períodos de agregación mayor.

3.5. Caso 5: Estimación de la Carga Media Anual para períodos definidos según la ocurrencia de las fases del Fenómeno ENSO.

En este caso las CCQsm Niña y Niño se aplicaron a las CDQI multianuales para tratar de obtener una idea

de su efecto en el transporte sedimentológico general. Para las épocas donde no se presentó ninguna de las dos fases, también se agruparon los aforos sólidos y se obtuvo la CCQsm para cada estación denominada de periodo Normal. La Figura 7 presenta la variación de la carga sólida promedio multianual en cada condición y el G.C. para las 8 estaciones consideradas en el estudio.

Los resultados de este caso indican valores de carga medida mayores para períodos Niña y menores en períodos Normales y Niño respecto a los parámetros medios multianuales en todas las estaciones. En términos generales se puede ver como los G.C. para períodos normales son superiores al 80%, mientras que para períodos Niño son bastante bajos no siendo superiores al 50% (Figura 7-b).

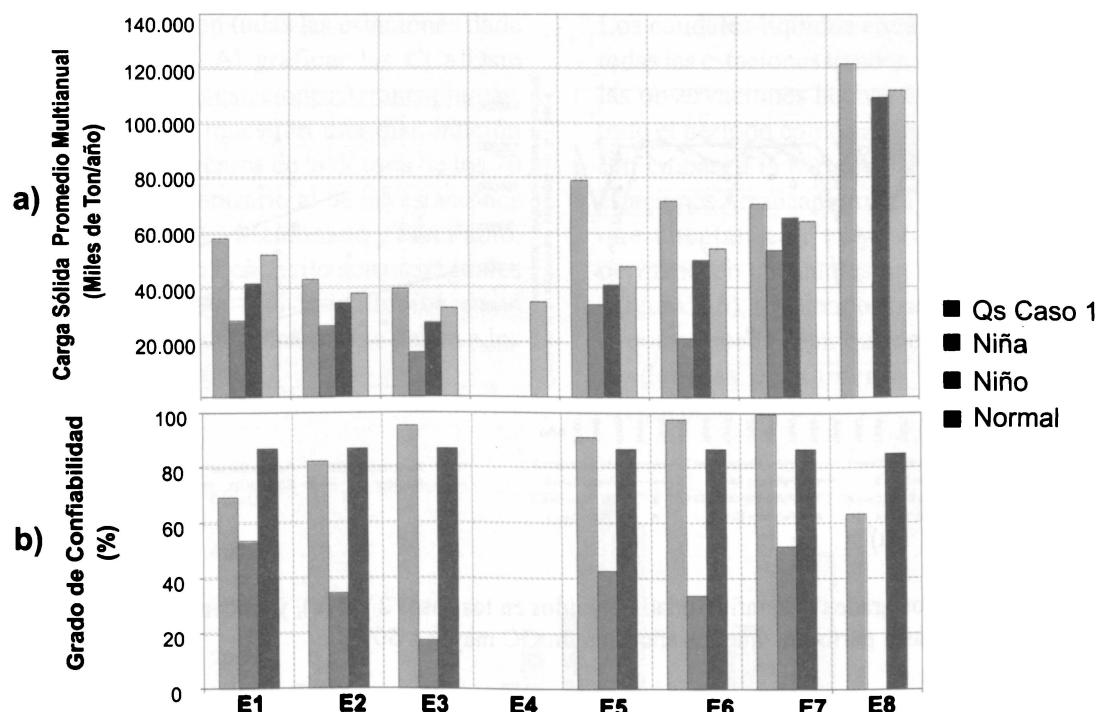


FIGURA 7. Tendencias de la variación de la carga sólida promedio anual (a), y grado de confiabilidad en los períodos Niño, Niña y Normal (b).

3.6. Caso 6: Incidencia de contar con mayor cantidad de información

Para estudiar el efecto de contar con mayor cantidad de información, aspecto que se vio reflejado en el desarrollo de los casos expuestos anteriormente, se obtuvieron CCalQsm en las 8 estaciones incrementando

sucesivamente el número de aforos de 5 en 5, se les calculó su respectivo k, n y coeficiente de correlación (R^2), el cual presenta grandes variaciones para CCalQsm obtenidas con menos de 15 registros de aforo en cualquiera de las estaciones llegando a ser de 0.1 en algunos casos como se ilustra en la Figura 8.

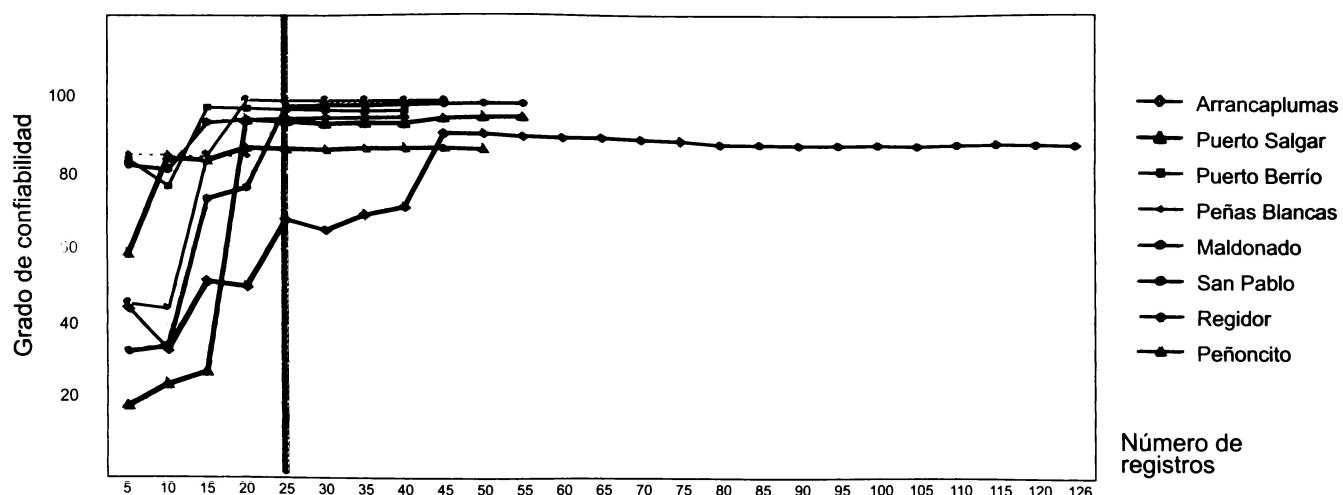


FIGURA 8. Variación del G.C. a medida que se aumenta la cantidad de aforos sólidos en todas las estaciones.

Al estimar la carga medida de sedimentos con las correspondientes CCaQsm se presentan bajos G.C. asociados a pocos registros, llegando a ser el 20% del caso 1, mostrando un aumento considerable al obtener las cargas con CCaQsm obtenidas con más de 25 registros.

En términos generales, se puede decir que la falta de un registro largo de datos de aforos sólidos en las estaciones de medición es una de las grandes limitaciones para estimar cargas de sedimentos de manera confiable.

4. CONCLUSIONES

Como respuesta al interrogante que llevó a plantear el desarrollo de este trabajo para el sector Puerto Salgar – La Gloria del río Magdalena, se puede decir que en la gran mayoría de los casos analizados de la variación

temporal observada, la carga de sedimentos medida no registra un aumento apreciable con el paso del tiempo, tendiendo más bien a disminuir ó a permanecer constante, como se puede apreciar en la Tabla 5 donde se resumen cualitativamente los resultados de los primeros cuatro. Todo esto parece desvirtuar el concepto general de que el incremento en el aporte de sedimentos por parte de la cuenca es la causa de un posible deterioro extremo de los cauces. Desde luego, debe tenerse en cuenta que en la presente investigación se ha supuesto que el cauce del río Magdalena tiene suficiente capacidad para transportar la totalidad de la carga de lavado que produce la cuenca, que corresponde esencialmente a la carga que es factible medir mediante las técnicas utilizadas rutinariamente en el país; de manera tal, que lo registrado en los aforos sólidos ha de coincidir con lo producido por la cuenca. Posteriores investigaciones deberán realizarse para evaluar la validez de la misma.

TABLA 1. Relación detallada de las características principales de cada uno de los casos de análisis incluidos en el trabajo.

No.	ESTACIÓN	CASO			
		1	2	3	4
1	Arrancaplumas				
2	Puerto Salgar				
3	Puerto Berrio				
4	Peñas Blancas				
5	Maldonado				
6	San Pablo				
7	Regidor				
8	Peñoncito				

CONVENCIONES
Referencia
Aumenta
Disminuye
Constante
Sin registros

La respuesta de la cuenca del río Magdalena ante la ocurrencia de los fenómenos Niño y Niña en relación con los sedimentos (Caso 5), es coherente con el comportamiento esperado según las condiciones hidroclimatológicas que imprime el fenómeno, es decir, que para períodos Niña no sólo se presenta un aumento relativo del caudal líquido, sino también de las cargas de sedimentos, mientras que en el caso de períodos Niño se observa el efecto contrario.

Como lo ilustra los análisis del caso 6, al disponer de mayor cantidad de aforos sólidos, la confiabilidad de las estimaciones del transporte siguiendo la metodología tradicional aumenta.

De la información analizada del río Magdalena se deduce que, sólo con más de 25 datos de aforos sólido registros es posible obtener estimativos aproximadamente confiables de la carga media anual, lo que obliga a agrupar aforos para varios períodos, para alcanzar tal criterio; lo cual, a su vez, permite concluir que resulta inconveniente definir curvas de calibración año a año, debido a que en ningún caso se tiene suficiente información, pues se hacen en promedio tres aforos por estación al año (Caso 4).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los ingenieros Hebert Gonzalo Rivera, Director (E) del IDEAM, por su colaboración al permitir el acceso a la información

hidrosedimentológica para el desarrollo del estudio, al Laboratorio de Ensayos Hidráulicos al facilitar la continuidad de las investigaciones en torno al río Magdalena, y a los miembros de la firma Estudios y Asesorías Ltda– Ingenieros Consultores – al permitir el acceso a estudios anteriores del tema desarrollado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Carl, R.M. 1951. Analysis of flow-duration, sediment rating curve method of computing sediment yield, Bureau of Reclamation United States.
- Cubillos, C.E. 1989. Una Metodología apropiada para la interpretación de los registros sedimentológicos en Colombia, Conclusiones. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Cubillos, C.E. y Ordóñez, J.I. 1990. Una Interpretación de las Mediciones Sedimentológicas Colombianas, Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Montevideo, Uruguay.
- Cubillos, C.E. y Pabón S. 2003. Registros depurados de las series de caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas de Arrancaplumas, Puerto Salgar, Puerto Berrio, Peñas Blancas, Maldonado, San Pablo, Regidor y Peñoncito, 1974 – 2000.
- ESTUDIOS y ASESORÍAS Ltda, Ingenieros Consultores. 1988. Estudio de Sedimentos en la Cuenca Alta del Río Magdalena. Hidráulica Fluvial Vol III.
- ESTUDIOS y ASESORÍAS Ltda, Ingenieros Consultores. 1982. Estudio de Sedimentos en la hoya del Magdalena Medio Vol III.
- Forero, G y Cubillos, C.E. 2004. Análisis de la Variación Temporal de la Carga Sólida medida del río Magdalena en el sector Puerto Salgar – La Gloria. Trabajo de Grado con mención Meritoria para optar al título de Ingeniera Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2003. Series de registros de caudales líquidos medios diarios y resúmenes de aforos sólidos de las estaciones hidrométricas 2123702, 2303701, 2309703, 2316701, 2315708, 2320704, 2502741, 2502733. Bogotá Colombia.
- Laboratorio de Ensayos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, L.E.H., U.N.
- Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena – CORMAGDALENA. 2000. Estudio de Caracterización Hidrosedimentológica del río Magdalena en el sector Puerto Salgar-La Gloria, Bogotá.
- Serrano O. 1986. Variación del régimen de caudales y transporte de sedimentos en la cuenca del río Magdalena Instituto de Meteorología y Adecuación de Tierras – HIMAT. Memorias del VII Congreso Colombiano de Hidrología. Bogotá.
- Searcy, J.K. Manual of Hydrology: Part 2, Low Flow Techniques – Flow Duration Curves, U.S.G.S.