

LA CARGA SEDIMENTARIA EN EL RÍO CAUCA EN SU ALTO VALLE GEOGRÁFICO



Carlos Alberto Ramírez Callejas, M.Sc.

Profesor Titular

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del
Ambiente, Universidad del Valle, Cali, Colombia
caramir@univalle.edu.co

Ricardo Andrés Bocanegra Vinasco

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del
Ambiente, Universidad del Valle, Cali, Colombia
ricardoa@univalle.edu.co

María Clemencia Sandoval García, Ing.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-
CVC, Cali, Colombia
maria-clemencia.sandoval@cvc.gov.co

RESUMEN

Los procesos morfológicos en los ríos son altamente complejos debido al gran número de variables que intervienen y que están interrelacionadas. La geometría del cauce, la rugosidad, las barras y las formas del lecho pueden variar con el cambio en los caudales y el transporte de sedimentos. A su vez, un cambio en las características morfológicas del río afecta las características hidráulicas y la carga de sedimentos en el cauce. Para lograr una mejor comprensión de los procesos fluviales es fundamental conocer y entender los procesos del transporte de sedimentos. En este trabajo se investigaron las características del transporte de sedimentos en el valle geográfico alto del río Cauca (Salvajina-La Virginia), incluyendo las tasas de transporte, la composición granulométrica y el análisis de las posibles

**Recibido: Abril 22 2009 *Aceptado: Mayo 30 2009*

relaciones entre el transporte de sedimentos y los parámetros hidráulicos, geométricos y del sedimento. Se encontró que la carga de lavado (arcillas y limos, principalmente) constituye como mínimo el 75% de la carga total en suspensión, reflejando el alto grado de intervención en la cuenca del río Cauca. La carga de fondo estimada con diferentes predictores (Van Rijn, Einstein, Meyer-Peter-Müller y Bagnold) generalmente son muy superiores a las medidas en campo (estaciones Hormiguero y Juanchito, año 2006). A partir de la analogía de la balanza de Lane se estableció un predictor para estimar la carga de material del lecho en función de las características hidráulicas, geométricas y del sedimento en las estaciones Hormiguero y Juanchito.

ABSTRACT

The morphological processes in a river are very complex because they are determined by numerous variables which are interrelated. The channel geometry, the roughness, the bars and the bed form vary with the flow regime and the sediment loads. At the same time, a variation in the morphological characteristics will cause changes in the hydraulics and sediment loads of the river. In order to get a better understanding of the fluvial processes it is very important to understand the sediment transport processes. In this work the sediment transport in the high valley of Cauca river was studied, including the transport rates, the bed sediment sizes and the analyzes of the relations between the hydraulic, geometric and sediment parameters and the sediment loads. It was found that the wash load (clays and muds, mainly) is, at less, 75% of the total suspended load, indicating the high grade of erosion of the Cauca river watershed. The bed load is overestimated when different predictors (Van Rijn, Einstein, Meyer-Peter-Müller and Bagnold) are used. From the Lane balance analogy a bed material load predictor is determined as a function of the hydraulic, geometric and sediment parameters in Hormiguero and Juanchito stations.

PALABRAS CLAVES

Transporte de sedimentos, granulometría, sedimentos de lodo.

KEYWORDS

Transport of sediments, granulometric, mulch sediments.

1. INTRODUCCIÓN

El río Cauca, con una longitud total de 1.350 km y una cuenca hidrográfica aproximada de 63.300 km², se constituye en uno de los ríos más importantes de Colombia.

El tramo de estudio en la presente investigación corresponde a su valle geográfico alto (Salvajina-La Virginia), el cual tiene una longitud aproximada de 450 km y se caracteriza por una dinámica muy intensa y las intervenciones antrópicas. Adicionalmente, la entrada en operación del proyecto hidroeléctrico de Salvajina en el año 1985 genera, aguas abajo en el río Cauca, un régimen regulado de caudales que afecta su comportamiento. En la Figura 1 se presenta la localización del tramo de estudio y las estaciones hidrométricas existentes en él.

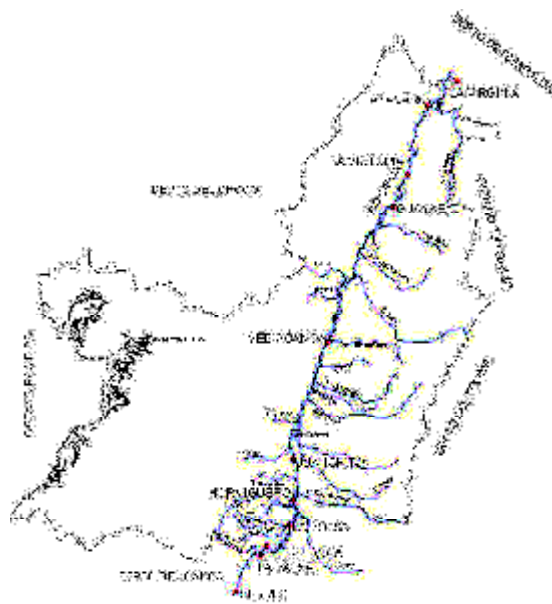


Figura 1 Área de Estudio

En este artículo se presenta la caracterización del material del lecho del río Cauca, el estudio de los modos y las tasas de transporte de sedimentos y el análisis de

las posibles relaciones entre el transporte de sedimentos y los parámetros hidráulicos, geométricos y del sedimento.

Debido a la variación impuesta por el embalse de Salvajina en el régimen de caudales y demás características hidráulicas, morfológicas y sedimentológicas en el río algunos de los análisis realizados consideran dos periodos: antes y después de la entrada en operación del embalse, denominados Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

2. MATERIAL DEL LECHO DEL RÍO CAUCA

El río Cauca en la zona de estudio presenta dos sectores con algunas diferencias hidráulicas y morfológicas.

La parte más alta (desde el embalse de Salvajina hasta la estación hidrométrica de Tablanca, de 37 km de longitud) se caracteriza por una baja sinuosidad, una pendiente del thalweg relativamente alta, y el predominio de material grueso (guijarros, piedras y gravas) en el lecho del cauce. Entre las estaciones hidrométricas Tablanca y La Virginia (aprox. 400 km), el río Cauca presenta una sinuosidad entre moderada y alta, una pendiente del fondo baja y un lecho conformado principalmente por arenas de diferentes tamaños.

Las variaciones morfológicas e hidráulicas del río Cauca afectan directamente los procesos del transporte de sedimentos y, por ende, la composición del material del lecho. Adicional a esto, los tributarios que descargan importantes volúmenes de agua y material granular grueso en este sector del río Cauca, afectan su comportamiento hidráulico y los procesos sedimentológicos.

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, en sus programas de monitoreo (aforos líquidos y sólidos), con alguna frecuencia realiza muestreos del material del lecho del río Cauca y los principales afluentes.

En el año 2003 en desarrollo del proyecto PMC se incluyó una campaña intensiva y detallada de muestreo del material del fondo del río Cauca y sus principales tributarios entre las estaciones hidrométricas Salvajina y La Virginia con el propósito de lograr una caracterización más detallada de la variación espacial de la

granulometría del material del lecho del río (Universidad del Valle - CVC, 2007a, 2004b, 1986, 1980).

En esta campaña se tomaron cerca de 280 muestras del material del fondo del río Cauca y principales afluentes, utilizando una draga tipo Pettersen y un tubo cilíndrico de boca cónica en el caso de lechos de arena y con presencia de gravas.

En los sitios donde la superficie del lecho estaba compuesta por gravas, guijarros y cantos expuestos en zonas de playas aluviales y barras (en la zona alta del río Cauca y en la mayoría de los tributarios) se tomaron registros fotográficos de la capa superficial utilizando el método superficial por malla y muestras volumétricas de la capa subsuperficial (para el posterior análisis en laboratorio) (Figura 1A).



Capa superficial

Capa sub-superficial

Figura 1A. Muestreo del material del lecho del cauce

Adicionalmente se efectuaron 15 perforaciones del lecho del río en 11 secciones transversales con un equipo mecánico de percusión de 130 lbs de peso y 30 pulgadas de caída libre, para extraer muestras del subsuelo a profundidades variables entre 4 m y 8 m por debajo del fondo, distribuidas a lo largo del río Cauca entre las estaciones La Balsa (K27) y La Virginia (K445).

Las muestras volumétricas obtenidas fueron analizadas visualmente *in situ* y en un laboratorio de suelos para determinar su granulometría y otras propiedades físicas.

2.1.1 Material Superficial del Lecho

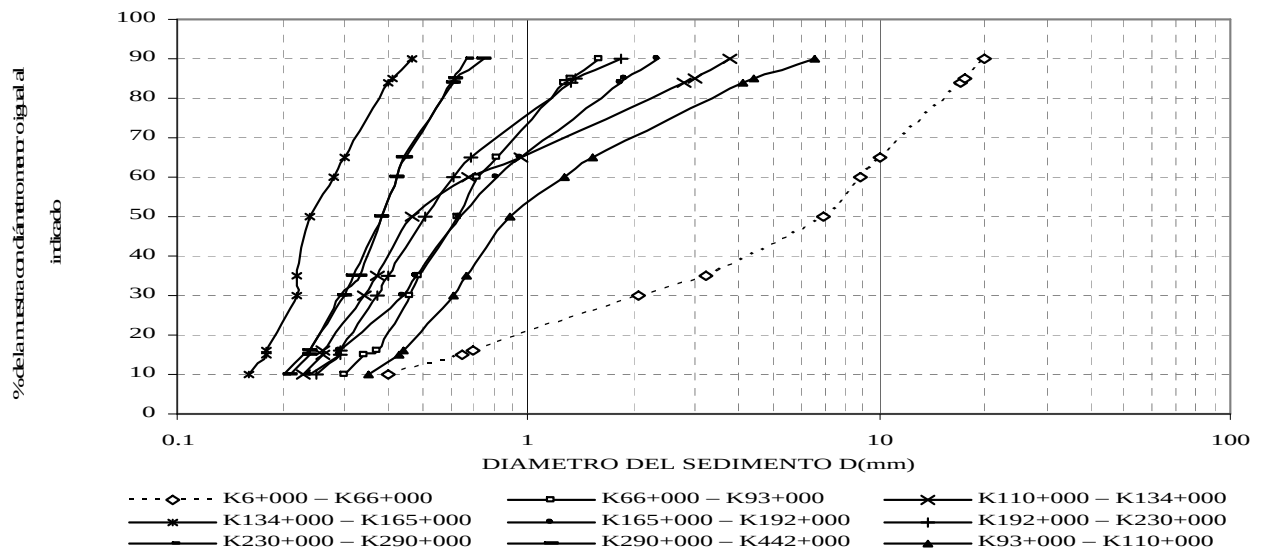


Figura 2 Curvas Granulométricas Medias por Tramos del Río Cauca Año 2003

Cuadro 1 Características Granulométricas por Subtramos del Material del Lecho del Río Cauca Año 2003

Subtramo	Diámetros Promedios (mm)											Coeficientes de gradación		
	d_{10}	d_{15}	d_{16}	d_{30}	d_{35}	d_{50}	d_{60}	d_{64}	d_{65}	d_{85}	d_{90}	C_u	s_{en}	C_g
K6+000 – K66+000	0,40	0,65	0,70	2,07	3,22	6,98	8,82	10,04	17,14	17,52	19,92	6,44	23,23	1,45
K66+000 – K93+000	0,30	0,34	0,37	0,46	0,49	0,63	0,72	0,81	1,27	1,32	1,60	1,59	2,25	1,07
K93+000 – K110+000	0,35	0,43	0,44	0,61	0,67	0,89	1,26	1,52	4,08	4,36	6,58	3,18	3,70	0,89
K110+000 – K134+000	0,23	0,26	0,26	0,34	0,37	0,47	0,68	0,95	2,77	3,00	3,77	3,56	3,31	0,80
K134+000 – K165+000	0,16	0,18	0,18	0,22	0,22	0,24	0,28	0,30	0,40	0,41	0,47	1,55	1,75	1,01
K165+000 – K192+000	0,24	0,29	0,29	0,44	0,48	0,64	0,81	0,95	1,85	1,90	2,35	2,89	4,17	1,09
K192+000 – K230+000	0,25	0,29	0,29	0,37	0,40	0,51	0,61	0,69	1,33	1,36	1,84	2,15	2,46	0,94
K230+000 – K290+000	0,20	0,23	0,24	0,29	0,33	0,38	0,42	0,45	0,60	0,61	0,67	1,58	2,07	1,01
K290+000 – K442+000	0,21	0,24	0,24	0,30	0,32	0,38	0,42	0,44	0,61	0,62	0,75	1,59	2,06	1,04

Con base en los resultados de la campaña de muestreo sedimentológico del año 2003 se calcularon los diámetros característicos, parámetros de gradación y estadísticos (coeficiente de uniformidad, C_u , coeficiente de gradación, C_g , y desviación estándar s_{en}), la composición porcentual del sedimento y las curvas granulométricas.

Los resultados se agruparon en nueve subtramos, de acuerdo con las características medias de las distribuciones de tamaños predominantes en cada uno de ellos (Figura 2 y Cuadro 1).

NOTA: Coeficiente de uniformidad $C_u = d_{60}/d_{10}$

Desviación estándar o típica $s_{en} = 0.50 * [(d_{50}/d_{16}) + (d_{84}/d_{50})]$

Coeficiente de gradación $C_g = (d_{30})/(d_{10} \cdot d_{60})$

En el primer subtramo (el de mayor pendiente del cauce), el lecho está conformado principalmente por gravas (70%) y, en menor medida, por arenas gruesas (15%) y medias (10%), con una buena gradación ($C_u > 6$ y C_g entre 1 y 3). En los siguientes subtramos predominan las arenas medias (38%), finas (23%) y gruesas (15%) mal gradadas, con una tendencia a la disminución del tamaño de las partículas, la cual es interrumpida en algunos sectores. El incremento localizado del tamaño del material del lecho del río Cauca se relaciona con el aporte

de sedimentos de los ríos tributarios, que por lo general, presentan lechos con materiales más gruesos que los del río Cauca.

3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RÍO CAUCA

Considerando el origen de los sedimentos se distinguen dos tipos de transporte: i) Carga de material de fondo, correspondiente al material erodado del lecho del cauce; y, ii) Carga de lavado, compuesta por los sedimentos aportados por la cuenca (generalmente muy finos, constituidos por arcillas y limos) y, ocasionalmente, de la erosión de las bancas del río.

De acuerdo con el mecanismo de transporte, la carga total sólida, S_t , se puede dividir en carga de fondo, S_{bb} , y carga total en suspensión, S_s . Esta última está conformada por la carga de lavado y la fracción de la carga de material de fondo que es suspendida por la turbulencia de la corriente y transportada en la columna de agua. La carga de fondo está constituida por las partículas del lecho que son transportadas sobre el fondo en una capa muy delgada saltando, rodando o deslizándose.

3.1 CARGA TOTAL EN SUSPENSION(S_s)

La carga total en suspensión en el río Cauca es determinada a través de las mediciones periódicas de la CVC en sus programas de monitoreo en las estaciones hidrométricas, utilizando equipos como los muestreadores puntual USP-61 e integrador USD-49.

Relación entre el Caudal y la Carga Total en Suspensión

Con base en la información de campo disponible se determinó la relación entre la carga total en suspensión y el caudal medio diario mediante modelos estadísticos de regresión ($S_s=aQ^b$), para los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (Figura 3).

Las relaciones halladas indican que, en general, la carga total en suspensión del río Cauca durante el período Post-Salvajina es inferior a la carga del período Pre-Salvajina, muy posiblemente como resultado de la retención de sedimentos en el embalse de Salvajina.

Carga Total en Suspensión Anual

En el Cuadro 2 se presentan las cargas totales en suspensión medias multianuales estimadas durante los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

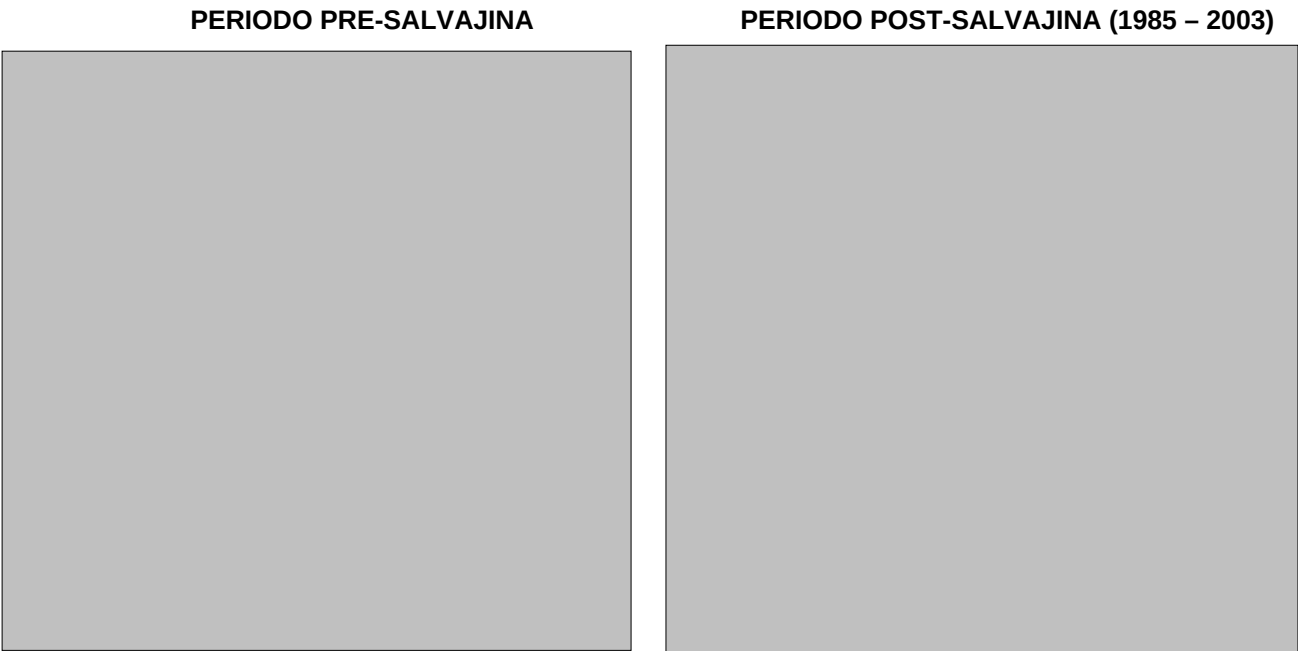


Figura 3: Caudal vs. Carga Total en Suspensión en el Río Cauca

Estación	Carga total en suspensión anual		Variación de la carga total en suspensión	
	Promedio (10 ⁶ Ton/año)			
	S _{spre} (10 ⁶ Ton)	S _{spost} (10 ⁶ Ton)	S _{spre} – S _{spost} (10 ⁶ Ton)	$\frac{(S_{spre} - S_{spost})}{S_{spre}} \times 100$
La Balsa	2,86	0,7	2,16	75,52
La Bolsa	-	1,12	-	-
Hormiguero	-	2,48	-	-
Juanchito	3,06	2,21	0,85	27,78
Mediacanoa	5,35	3,59	1,76	32,90
Guayabal	5,85	3,76	2,09	35,73
La Victoria	5,31	3,36	1,95	36,72
Anacaro	6,75	4,58	2,17	32,15

Cuadro 2: Carga Total en Suspensión (S_j) Media Multianual Períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina

Después de la puesta en operación del embalse de Salvajina se registra una disminución generalizada en el volumen anual de sedimentos suspendidos totales, lo cual está relacionado principalmente con la regulación de caudales en Salvajina y la retención de sedimentos en el embalse.

La mayor variación en la carga total suspendida multianual se presenta en la estación La Balsa, con una reducción del 75% respecto al periodo Pre-Salvajina, mientras que en la estación Juanchito la carga total en suspensión se ha reducido en un 28% y en las estaciones localizadas aguas abajo de esta última la disminución de la carga total en suspensión es de cerca de un 34%, en promedio. La carga total en suspensión media multianual aumenta considerablemente hacia aguas abajo en el río, en los dos periodos, debido principalmente a los aportes acumulados de la carga de lavado proveniente de la erosión de la cuenca.

Carga Total en Suspensión Media Mensual Multianual

La carga total en suspensión media mensual multianual presenta una reducción durante la mayor parte del año, principalmente durante los meses de invierno (abril, mayo, noviembre y diciembre) (Figura 4). Por el contrario, durante el periodo de verano más intenso (julio – septiembre) la carga total en suspensión se incrementa ligeramente en la mayoría de las estaciones. Este comportamiento es consecuencia del efecto regulador del embalse de Salvajina, el cual atenúa los caudales

durante el invierno y los incrementa durante el verano.

La variación de la carga total en suspensión media mensual multianual entre los periodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina varía espacial y temporalmente. Generalmente en los meses más secos, con niveles de agua y caudales más bajos, la disminución relativa o porcentual de la carga es menor que la disminución relativa estimada para los meses de invierno. La reducción de la carga total en suspensión es significativa en todas las estaciones para los meses de enero a junio y de octubre a diciembre, presentándose en la estación La Balsa la mayor reducción, con un promedio de 73% para los meses mencionados.

3.2 CARGA DE LAVADO (S_j)

La carga de lavado en el río Cauca se investigó en desarrollo del Estudio Morfológico del río Cauca y del proyecto PMC (CVC – Universidad del Valle, 1986 y 2000). En el primer estudio, los resultados obtenidos mostraron que la carga de lavado representa, en promedio, el 75% de la carga total en suspensión. En la segunda investigación se encontró que, en promedio, la carga de lavado en la estación hidrométrica de Juanchito representa como mínimo el 77,5% de la carga total en suspensión, adoptando 50 µm como tamaño máximo para la carga de lavado. Teniendo en cuenta el alto grado de intervención de la cuenca del río Cauca y la erosión de sus bancas en muchos sectores a lo largo de su recorrido se estima que la carga de lavado podría estar presente en el río Cauca incluso en porcentajes superior-

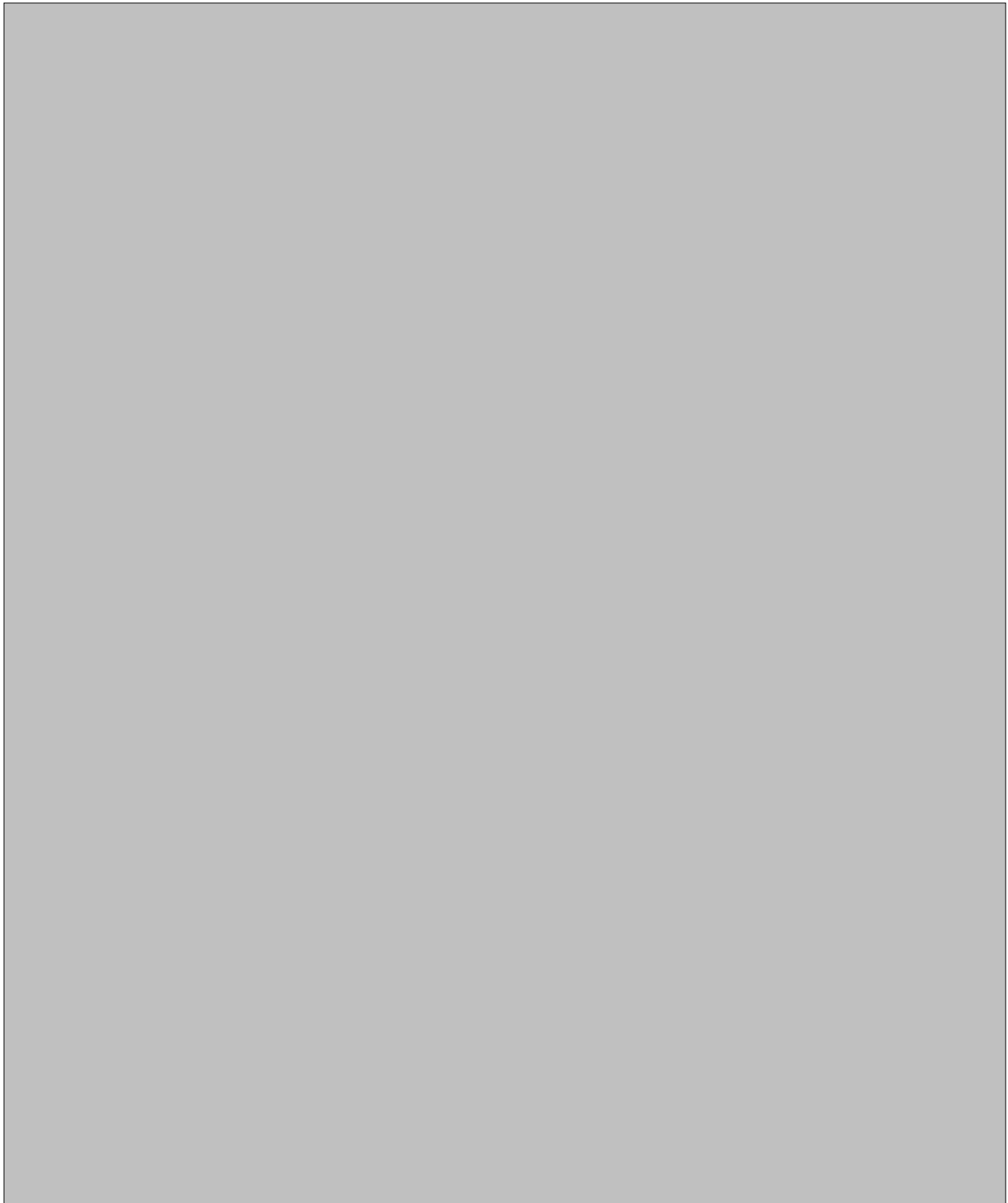


Figura 4 Carga Total en Suspensión Media Mensual Multianual Periodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina

res a los registrados.

3.3 CARGA EN SUSPENSIÓN (S_{bs})

Adoptando una carga de lavado del 75% de la carga total en suspensión, es posible estimar la carga en suspensión en el río Cauca. De esta manera la carga en suspensión resulta igual al 25% de la carga total en suspensión. Sin embargo, dado que la carga de lavado puede variar tanto espacial como temporalmente, en porcentajes aún mayores, la carga en suspensión podría, en ocasiones, representar fracciones menores de la carga total en suspensión. Al relacionar la carga en suspensión diaria estimada y el caudal medio diario se obtienen las siguientes expresiones:

Período Pre-Salvajina:

$$S_{bs} = 0,00925Q^{2,179} \quad R^2 = 0,76$$

Período Post-Salvajina:

$$S_{bs} = 0,025Q^{1,9409} \quad R^2 = 0,72$$

Puesto que se ha considerado que la carga en suspensión es una fracción constante de la carga total en suspensión, los análisis de su variación entre los periodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina y la variación mensual en las diferentes estaciones son similares a los de la carga total suspendida.

3.4 CARGA DE FONDO (S_{bb})

En el río Cauca se han efectuado dos estudios, incluyendo programas de monitoreo, de la carga de fondo. El primer trabajo, realizado en desarrollo del Estudio Morfológico del río Cauca (CVC – Universidad del Valle, 1986), incluyó las mediciones de la carga de fondo utilizando el equipo muestreador BTMA (Bed Transport Meter Arhem) en las estaciones Tablanca (K37+702), Navarro (K133+084), Paso de la Torre (K175+422) y San Francisco (K409+228) en el año 1981. En el año 2006 durante la Fase III del PMC (CVC – Universidad del Valle, 1986) se realizó una campaña de campo para medir la carga de fondo en las estaciones Hormiguero (K115+850) y Juanchito (K140+952), empleando el equipo Helley – Smith. Con base en los datos de las cargas de fondo y los parámetros hidráulicos y geométricos se realizaron diferentes análisis con el fin de establecer las posibles relaciones entre ellos y evaluar la aplicabilidad de las formulaciones desarrolladas por diferentes investigado-

res.

Cálculo de la Carga de Fondo Mediante Predictores. Año 1981

A partir de los registros de los programas de campo realizados en el año 1981 en las estaciones Tablanca, Navarro, Paso de la Torre y San Francisco, y en el año 2006 en las estaciones Hormiguero y Juanchito, se estimó la carga de fondo aplicando algunos de los predictores o formulaciones más comunes para ríos aluviales.

En la Figura 5 se presenta la relación entre las cargas de fondo medidas y calculadas empleando los predictores de Einstein modificado, Meyer-Peter-Müller modificado y Schoklitsch en las estaciones Tablanca, Navarro, Paso de la Torre y San Francisco en el año 1981; debe mencionarse que el reducido número de datos disponibles en cada una de las estaciones impide un análisis estadístico riguroso, así como definir las tendencias en las relaciones entre las cargas de fondo medidas y calculadas. No obstante, es posible destacar los siguientes aspectos: (i) la formulación de Schoklitsch tiende a subestimar la carga de fondo en el río Cauca; (ii) las formulaciones de Einstein modificado y Meyer-Peter-Müller tienden a sobreestimar la carga de fondo; y, (iii) la formulación de Van Rijn arroja cargas de fondo muy superiores a las medidas en campo.

Cálculo de la Carga de Fondo Mediante Predictores. Año 2006

La Figura 5 presenta la relación entre las cargas de fondo medidas en las estaciones Hormiguero y Juanchito en el año 2006 y las cargas de fondo calculadas con los predictores de Van Rijn, Einstein, Meyer-Peter-Müller y Bagnold. Dado que los valores calculados empleando estas formulaciones, generalmente, son muy superiores a los registrados en campo, se considera que ninguno de los predictores utilizados es aplicable para calcular el transporte de fondo en las estaciones Hormiguero y Juanchito.

Cabe señalar que el sector comprendido entre las estaciones Hormiguero y Juanchito y aguas arriba del mismo, está sometido a una intensa extracción de materiales del lecho, por lo cual muy posiblemente las tasas de transporte de sedimentos de fondo actuales son inferiores a la capacidad real de transporte del río, dado que la disponibilidad de materiales de arrastre puede haberse reducido ostensiblemente. Por otra parte, en el sector Hormiguero-Juanchito y otros sectores del río Cauca a su paso por el departamento de Valle del

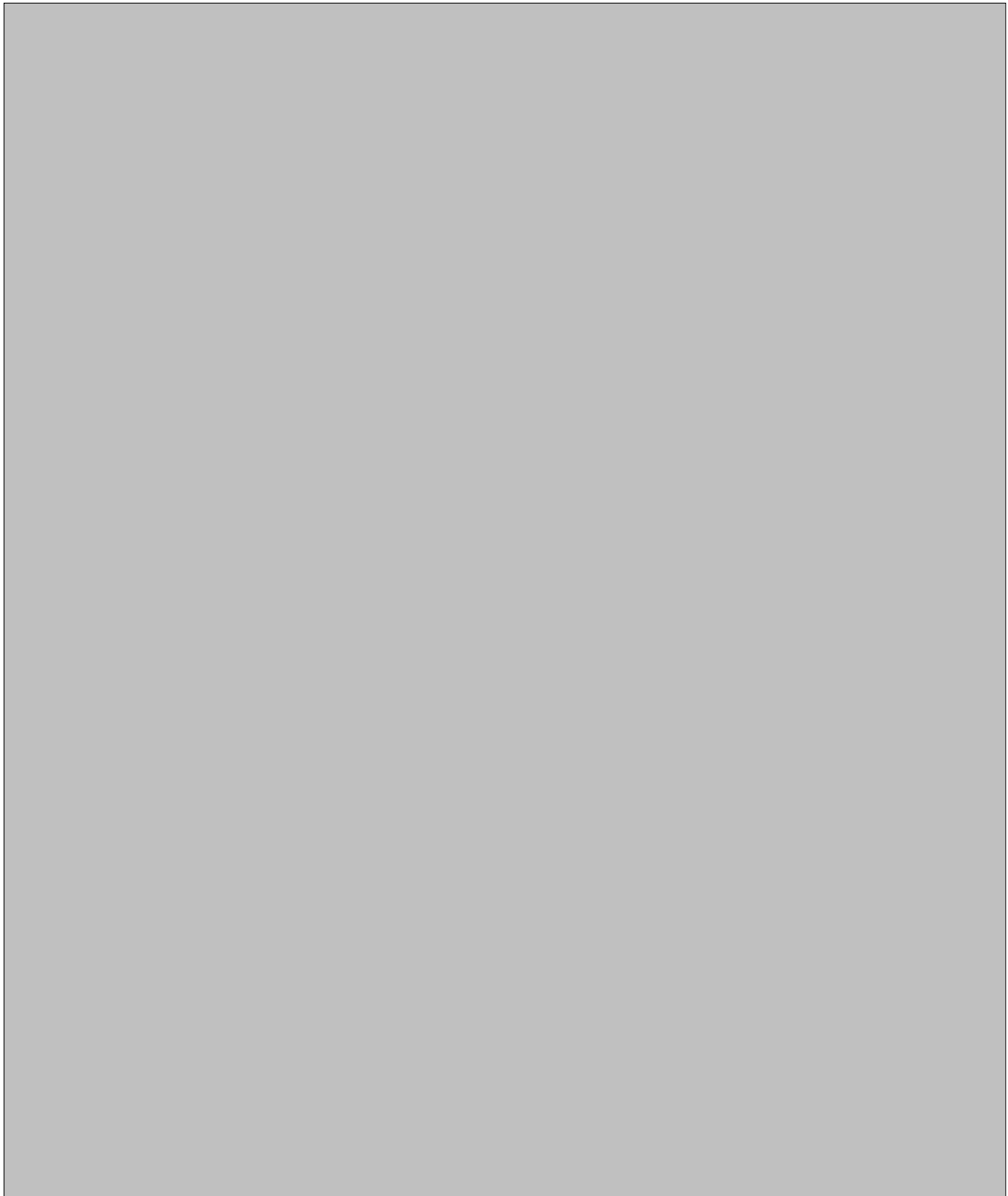


Figura 5 Relación entre las Cargas de Fondo Calculadas y Medidas Año 1981

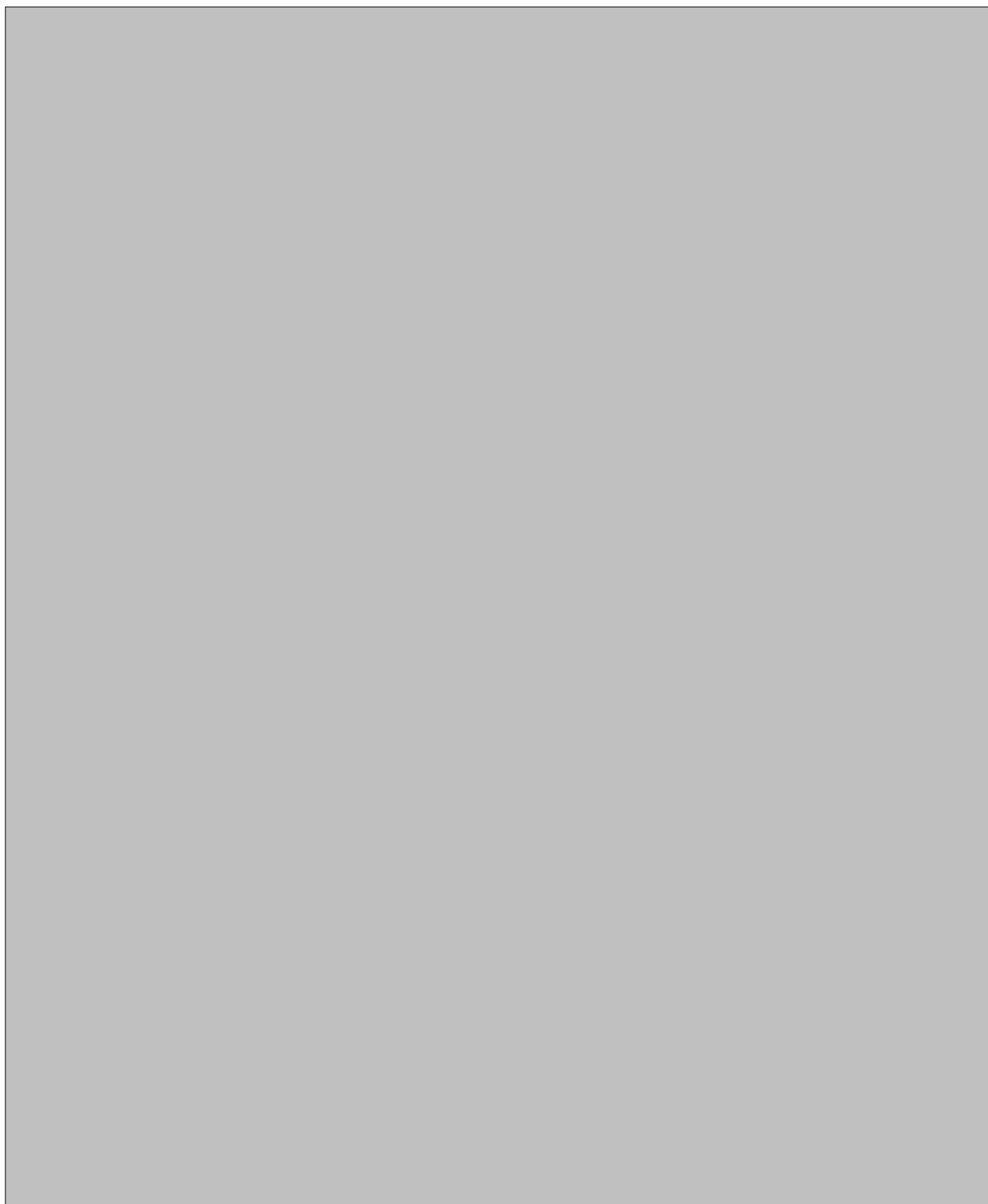


Figura 5 Relación entre las Cargas de Fondo Calculadas y Medidas Año 2006

Cauca, se encuentran importantes extensiones del lecho del cauce conformadas por un material consolidado, de una dureza aparente, denominado caliche; es decir, el lecho del río no se encuentra constituido completamente de materiales granulares sueltos, resultando afectadas lógicamente las tasas de transporte de fondo.

3.5 CARGA DE MATERIAL DE FONDO

La carga de material de fondo medida resulta de la suma de la carga de fondo y la carga en suspensión. De esta manera se determinaron las cargas de material de fondo en las estaciones Tablanca, Navarro, Paso de la Torre y San Francisco (Toro) en el año 1981 y en las estaciones Hormiguero y Juanchito en el año 2006.

Cálculo de la Carga de Material de Fondo Mediante Predictores. Año 1981

La carga de material de fondo se calculó en las estaciones Tablanca, Navarro, Paso La Torre y San Francisco aplicando los predictores de Engelund-Hansen, Ackers-White, Toffaleti, Van Rijn, Colby, Laursen, Kalinske, Inglis-Lacey y Einstein – Brown (Universidad del Valle - CVC, 2000 - 2001). La Figura 6 presenta la relación entre las cargas de material de fondo medida y calculada para los predictores que arrojan los mejores resultados. Las cargas calculadas mediante la formulación de Ackers-White son algo similares a las cargas medidas; las cargas estimadas por el método de Toffaleti generalmente resultan inferiores a las cargas medidas. Las tasas de transporte estimadas por medio de la formulación de Engelund-Hansen en la estación Tablanca son muy superiores a las medidas; la ecuación de Van Rijn, en algunas estaciones, sistemáticamente subestima la

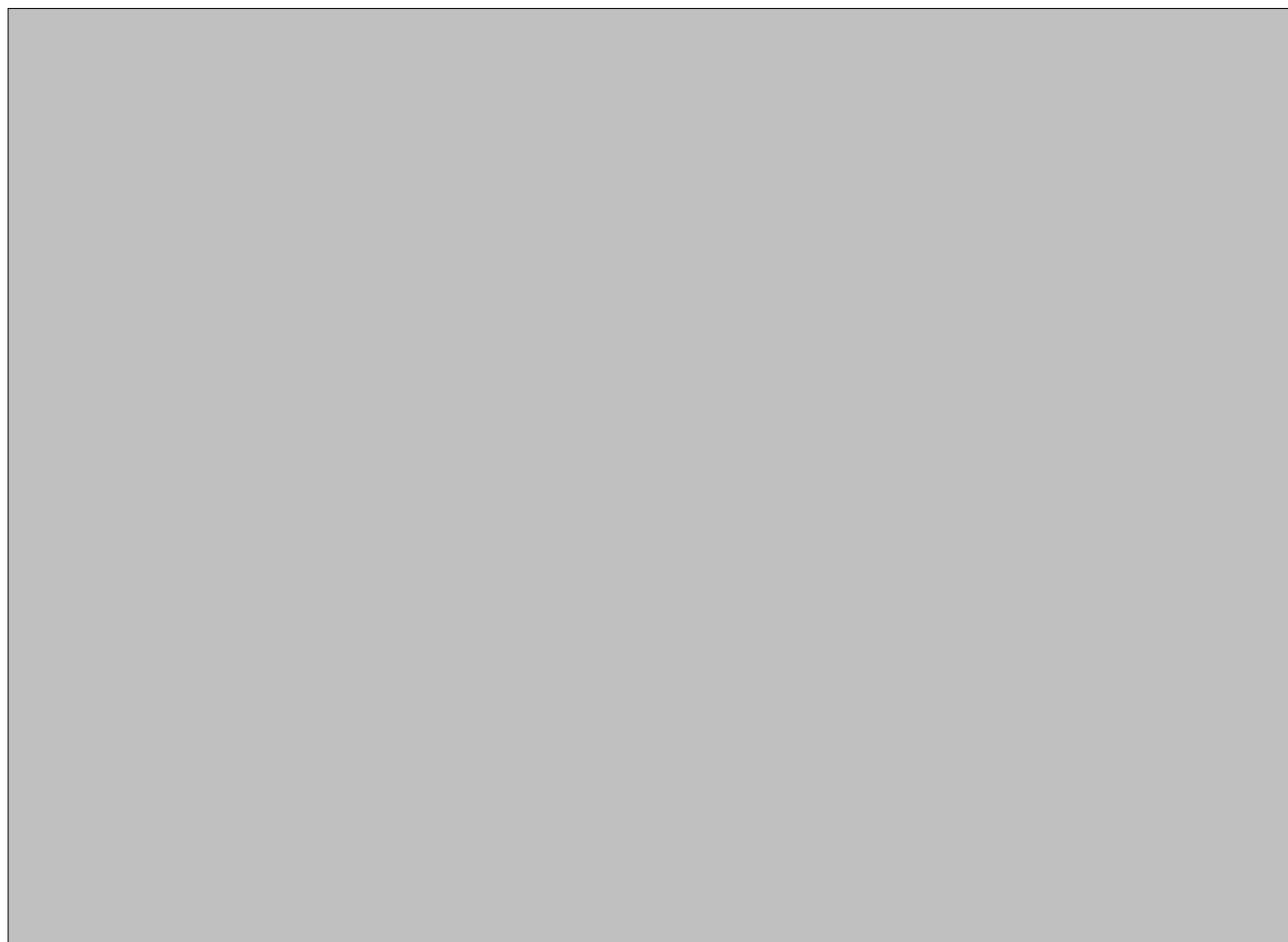


Figura 6 Relación entre las Cargas de Material de Fondo Calculadas y Medidas Año 1981

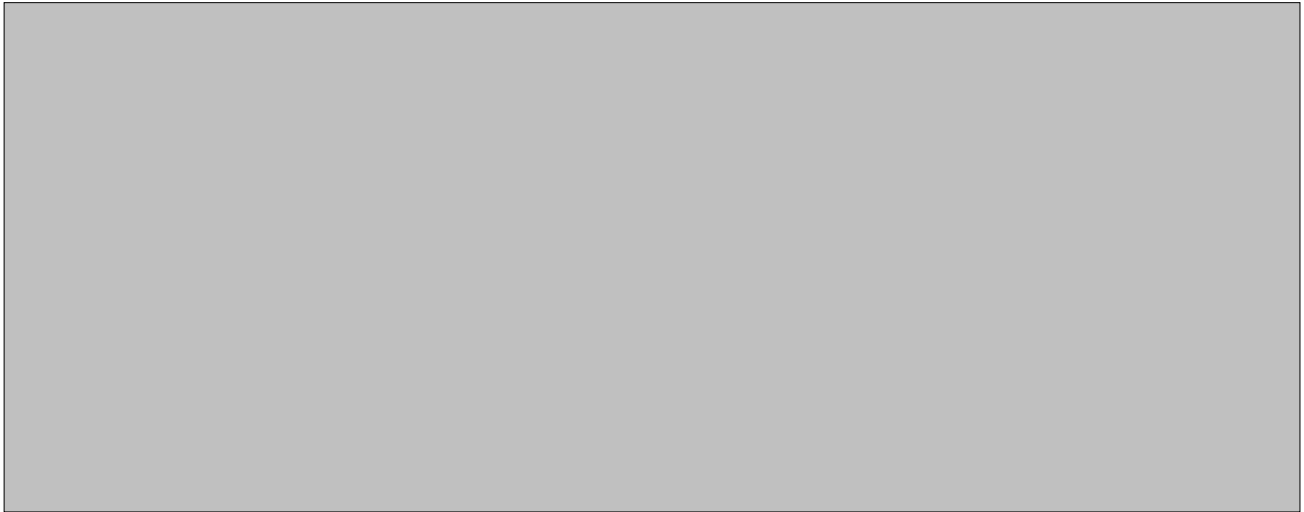


Figura 7 Relación entre las Cargas de Material de Fondo Calculadas y Medidas Propuesta de un Predictor de la Carga de Material de Fondo para el Río Cauca

carga de material de fondo mientras que en otras las sobreestima. En conclusión, la formulación de Ackers-White se considera como la más apropiada, entre las evaluadas, para estimar la carga de material de fondo de acuerdo con las condiciones del río en el año 1981.

Cálculo de la Carga de Material de Fondo Mediante Predictores. Año 2006

La información de campo recolectada en el año 2006 en las estaciones Hormiguero y Juanchito permitió estimar la carga de material de fondo empleando dos de los predictores que arrojaron resultados aceptables cuando se evaluaron para el programa del año 1981 (Ackers-White y Engelund-Hansen). Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 7, en la cual se observa que en la estación Hormiguero las dos formulaciones arrojan, en términos generales, resultados similares a los registrados en campo y, por tanto, podrían ser utilizadas para realizar un cálculo aproximado del transporte de material de fondo. Por el contrario, en la estación Juanchito ambos predictores sobreestiman de manera exagerada la carga de material de fondo, por lo cual no se consideran adecuados para estimar el transporte sólido en esta estación.

Teniendo en cuenta las diferencias encontradas entre las cargas de material de fondo medidas y las calculadas mediante los diferentes predictores, se ha intentado

establecer una ecuación simplificada para el río Cauca en función de las características hidráulicas, geométricas y del sedimento con base en los registros de campo disponibles.

El predictor propuesto se sustenta en la analogía de la balanza de Lane de 1955 (Vide, 1997; Simons y Sentürk, 1992) la cual considera una proporcionalidad entre el producto del transporte sólido y el tamaño del sedimento, y el producto de la descarga líquida y la pendiente del cauce ($S_b d \propto Q^n$). Integrando en esta relación la expresión de Chezy para la velocidad y la ecuación potencial del transporte sólido unitario en función de la velocidad de la corriente ($S = a \times v^b$) (Jansen *et al.*, 1979) se obtiene finalmente una expresión de la siguiente forma (Universidad del Valle - CVC, 2000):

$$S_b = m \times \frac{Q^n}{r^n B^{n-1} d_{50}}$$

donde m y n son un coeficiente y un exponente característicos del cauce, los cuales se calculan aplicando modelos estadísticos de regresión.

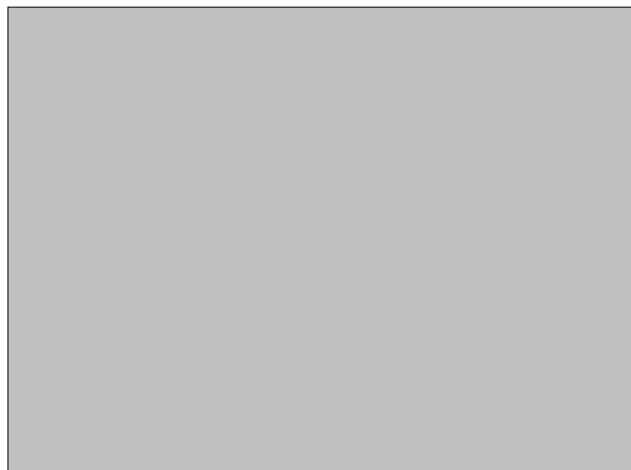
Con base en la información de campo recolectada en el año de 1981 durante el Estudio Morfológico del Río Cauca se obtuvo la relación que se presenta en la Figura 10, la cual, a pesar de no arrojar un coeficiente de determinación alto, sí muestra cierta correspondencia entre la carga de material de fondo y los parámetros hidráulicos y del sedimento.

Posteriormente, en desarrollo del Proyecto PMC y utilizando los datos obtenidos mediante la campaña de campo del año 2006 en las estaciones Hormiguero y Juanchito, se ensayó el mismo tipo de modelo (relación de la balanza de Lane) obteniendo expresiones con mejores ajustes (Figura 8 y 8A). En este segundo estudio se evaluaron de manera independiente estas dos

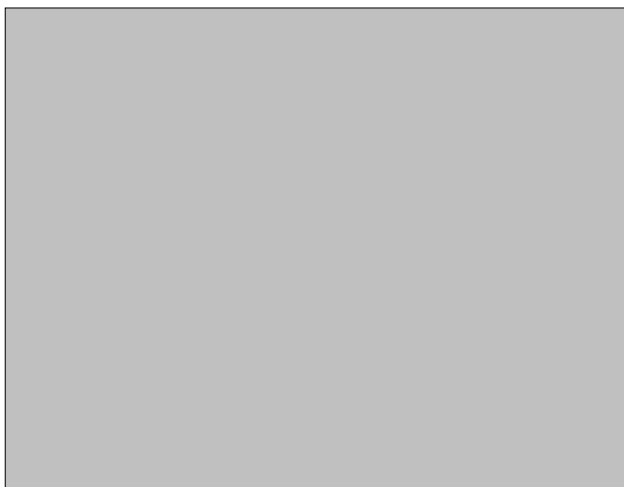
estaciones teniendo en cuenta el alto grado de intervención del río por la extracción de materiales del lecho.

Finalmente debe señalarse que, dada la gran variabilidad espacial y temporal que suele presentar el transporte de sedimentos en un río, los resultados aquí presentados no deben considerarse definitivos y por el contrario se debe continuar investigando los procesos del transporte de sedimentos en el río Cauca y sus tributarios, realizando nuevos monitoreos en ellos y evaluando e implementando otros métodos de campo para la cuantificación de las tasas de transporte, tales como seguimiento del desplazamiento de dunas, trampas de sedimentos o trincheras, etc.

Estaciones Tablanca, Navarro, Paso de la Torre y San Francisco Año 1981



Estación Hormiguero Año 2006



Estación Juanchito Año 2006

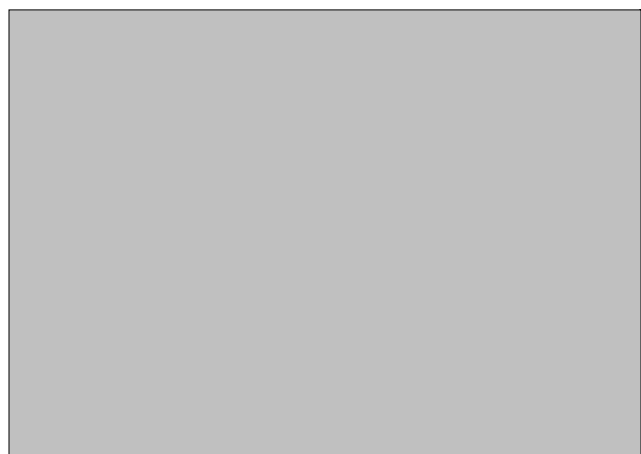


Figura 8 Relación entre la Carga de Material de Fondo y los Parámetros Hidráulicos y del Sedimento

4. CLASIFICACIÓN DEL CAUCE DE ACUERDO CON EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Schumm (1977) propuso tres categorías para clasificar los cauces de ríos aluviales de acuerdo con la relación entre la carga de fondo y la carga total: (i) Cauce de carga en suspensión, cuando la carga de fondo es inferior al 3% de la carga total; (ii) Cauce de carga mixta, cuando la carga de fondo representa entre el 3 y el 11% de la carga total; y, (iii) Cauce de carga de fondo, si la carga de fondo representa más del 11% de la carga total transportada. Para realizar la clasificación del río Cauca de acuerdo con esta metodología se emplearon los registros de campo de las cargas totales en suspensión y de fondo en las estaciones monitoreadas, como son, Tablanca, Navarro, Paso de la Torre y San Francisco.

Los resultados del análisis permiten clasificar al río Cauca, en el sector más alto del tramo de estudio, como un cauce de carga de fondo dado que en la estación Tablanca la carga de fondo representa cerca del 16% (superior al 11%) de la carga total transportada por el río, lo cual es razonable si se tiene en cuenta la magnitud de la pendiente del lecho en esta zona. Para el sector de la estación Navarro, el río puede considerarse como un cauce de canal único y carga mixta, donde la carga de fondo es, en promedio, el 5,4% de la carga total transportada. Por último, en la parte baja del tramo de estudio, representado por las condiciones sedimentológicas existentes en las estaciones Paso de la Torre y San Francisco, el río puede clasificarse como un cauce de carga en suspensión dado que la carga de fondo representa solamente cerca del 1,3% de la carga total transportada por el río.

5. CONCLUSIONES

- El material del fondo del río Cauca en la parte superior de su valle geográfico alto (aproximadamente los primeros 80 km) está constituido principalmente por materiales granulares como gravas, guijarros y piedras y arenas en menor proporción; en la parte media y baja del río predominan las arenas de diferentes tamaños.
- La carga de lavado en el río Cauca representa al menos el 75 % de la carga total en suspensión; sin embargo, debido al deterioro de la cuenca y a la erosión de las bancas por la alta movilidad del cauce, la carga de lavado puede encontrarse en proporciones aún ma-

yores.

- Las diferentes formulaciones aplicadas para el cálculo de la carga de fondo tienden a sobrestimar las cargas en el río Cauca. Esto puede deberse a diferentes factores, tales como: (i) el río puede estar transportando sedimentos por debajo de su capacidad efectiva a causa de la explotación intensiva de materiales del lecho (materiales de arrastre), ó (ii) muchas de los predictores disponibles han sido desarrollados para cauces de características hidráulicas, sedimentológicas y morfológicas diferentes a las del río Cauca.
- A partir de la analogía de la balanza de Lane se estableció un predictor para estimar la carga de material del lecho en función de las características hidráulicas, geométricas y del sedimento en las estaciones Hormiguero y Juanchito.
- En el tramo de estudio, es decir, el valle alto, en el río Cauca se pueden observar tres sectores con cargas sedimentarias diferentes: en su parte alta el cauce es de carga de fondo, en la parte media de carga mixta y en la parte baja de carga en suspensión.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bunte, K. y Abt, S. (2001). Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel- and Cobble - Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring. Rocky mountain Research Station, Colorado. USDA United States Department of Agriculture. General Technical. Report RMRS-GTR-74.
- Fripp, J.B. y Diplas, P. (1993). Surface Sampling in Gravel Streams. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(4), 473-490.
- Maza, J.A. y García, M. (1996). Manual de Ingeniería de Ríos, Capítulo 10 Transporte de Sedimentos. Series del Instituto de Ingeniería 584. Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- Schumm, S.A. (1977). The Fluvial System. John Wiley and Sons, New York, E.E.U.U. ISBN 0-471-

01901-1.

Universidad del Valle - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC. (1986) Estudio Morfológico del Río Cauca II Etapa. Informe Final Volúmenes 1 y 2. Cali, Colombia.

Universidad del Valle - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC. (2000 - 2001). PMC - Fase I, Volúmenes I, II y III, Caracterización del Río Cauca. Proyecto de Modelos del Río Cauca. Cali, Colombia. Reporte Técnico.

Universidad del Valle - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC. (2004b). PMC - Fase II, Volumen II, Muestreo Sedimentológico del Material de Fondo del Río Cauca y Principales Tributarios. Proyecto de Modelos del Río Cauca. Cali, Colombia. Reporte Técnico.

Universidad del Valle - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC. (2005g). PMC - Fase II, Volumen XVII, Caracterización del Río Cauca y sus Ríos Tributarios -El Río Cauca En Su Valle Medio Geográfico. Proyecto de Modelos del Río Cauca. Cali, Colombia. Reporte Técnico.

Universidad del Valle - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC. (2007a). PMC - Fase III, Volumen X, Estudio del transporte de sedimentos de fondo en el río Cauca. Sectores Hormiguero y Juanchito. Cali, Colombia. Reporte Técnico.

Universidad del Valle - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC. (2007a). El Río Cauca en su Valle Alto. Un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia. Cali, Colombia.

Van Rijn, L.C. (1993). Principles of Sediments Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans. Aqua Publications. Amsterdam, The Netherlands.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.