

# Cuantificación de la Carga Lavada y de Material de Lecho Hasta un Sitio de Embalse y Comparación con Valores Reportados por Batimetrías

Fernando Ovalles<sup>1</sup>, Omar Juresa<sup>2</sup>, Juan Martínez<sup>3</sup>  
fer8992@gmail.com, osjuresa92@gmail.com, martinezcjc@yahoo.com

<sup>1</sup>Ingeniero en Proyectos Hilti, Gran Bretaña.

<sup>2</sup>Ingeniero Civil. Jefe Departamento de Ingeniería Marítima, Portuaria y Costera en Oceangreen Perú Associated Consultants S.A.C. Lima, Perú.

<sup>3</sup>Departamento de Hidráulica de la Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela  
Historia del Artículo

Recibido: 30 de Octubre de 2018

Aceptado: 19 de Diciembre de 2018

Disponible online: 19 de Diciembre de 2018

---

**Resumen:** La presa Ing. Francisco C. Amelinck sobre el río Yaracuy en Venezuela, da origen al embalse de Cumaripa el cual recibe los aportes de una cuenca con superficie del orden de los 435 km<sup>2</sup>. La operación del embalse se inició en 1971, y de acuerdo a una batimetría realizada en 1989, en ese lapso de 18 años se habían acumulado en el embalse cerca de 41 Hm<sup>3</sup> de sedimento mientras que en el proyecto se contempló un volumen de aguas muertas de 7,05 Hm<sup>3</sup> el cual debería ser copado durante la vida útil de 100 años prevista para el embalse. En este trabajo se realizan estimaciones de la carga lavada y la carga de material de fondo con la finalidad de calcular la carga total anual de sedimentos afluentes hasta el embalse.

**Palabras Clave:** Embalses, Sedimentos, Carga Lavada, Transporte de Sedimentos, Vida Útil.

## Quantification of the Wash Load and Bed Material Load to a Reservoir Site and Comparison with Reported Values from Bathymetries

**Abstract:** Eng. Francisco C. Amelinck dam on the Yaracuy River in Venezuela generates Cumaripa's reservoir which receives the contributions of a watershed about 435 km<sup>2</sup>. The operation of the reservoir began in 1971, and according to a bathymetry in 1989, accumulated sediment was about 41 Hm<sup>3</sup> during that period of 18 years, while projected dead volume was 7,05 Hm<sup>3</sup>, for a reservoir design lifetime of 100 years. In this work there are estimates of sediment yield (wash and bed material load) with the purpose of estimating mean annual sediment yield to the reservoir.

**Keywords:** Reservoirs, Sediment, Wash Load, Sediment Transport, Design Life.

---

### I. INTRODUCCIÓN

En la etapa de diseño de una presa de embalse es necesario determinar entre otros aspectos, el volumen de

sedimentos que se irán depositando en el vaso a medida que transcurra el tiempo, ya que ello es relevante para elegir la cota mínima a partir de la que se ubicará la obra de toma, a los efectos de prevenir problemas durante la operación y explotación del reservorio.

En este trabajo se estima la producción de sedimento de la cuenca mediante el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) en su forma modificada (MUSLE) según la propuesta de Williams y Berndt [1]. A efectos de estimar la capacidad de transporte de sedimento que posee un cauce dado, existen diferentes metodologías, algunas capaces de discernir entre la cantidad de sedimento que es transportado en suspensión, de la cantidad transportada por el fondo, mientras que, otros métodos, reportan valores totales (carga en suspensión más carga de fondo). En ambos enfoques la fuente del material es la misma: material propio del cauce (bed material). Los métodos que se utilizaron en este estudio son los siguientes: Shields [2], Einstein [3], Laursen [4], Rottner [5], Graf y Acaroglu [6], Engelund y Hansen [7], Ackers y White [8], Yang [9] y Karim [10].

La suma de lo aportado por la cuenca, que recibe el nombre de carga lavada (wash load), con la carga de material de fondo (bed material load) resulta en la carga total de sedimento (sediment yield) aportado hasta un sitio dado, como puede ser un embalse.

Para el embalse de Cumaripa, seleccionado como caso de estudio, se estimó la carga total de sedimento aportada por la cuenca del río Yaracuy, y ésta fue objeto de comparación con los volúmenes de sedimento retenidos en el vaso, según lo reportado por varios estudios batimétricos.

Este artículo es un resumen de la tesis de los dos primeros autores como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica Andrés Bello en Caracas [11].

## II. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA PRESA Y EMBALSE Y SITUACIÓN ACTUAL

La cuenca del río Yaracuy, se encuentra localizada en la parte central del estado Yaracuy, Venezuela, con un área aproximada de 435 km<sup>2</sup> hasta el embalse Cumaripa.

La presa Ing. Francisco C. Amelinck se encuentra en el sitio denominado El Voladero, situado 4 km aguas abajo del puente Cumaripa, que forma parte de la carretera Nirgua-Chivacoa y que permite el tránsito sobre el embalse. La presa se construyó entre 1967 y 1971 y su propósito es suministrar agua para poblaciones en los municipios San Felipe, Independencia, La Trinidad, Sucre, Arístides Bastidas y Cocorote, destacándose las poblaciones de San Felipe y Cocorote, control de crecidas, retención de sedimento, riego de 10.600 ha en la cuenca media del río Yaracuy, y recreación.

La presa es de tierra zonificada de 29 m de alto, con cresta de 8,50 m de ancho y cota 207,5 msnm.

El embalse fue diseñado para un nivel de aguas normales de 202,30 msnm al que le corresponde una capacidad de 107,75 Hm<sup>3</sup> y un área inundada de 1.300 ha. En la etapa de proyecto se estimó que el volumen de sedimento a retener durante su vida útil de 100 años sería 7,05 Hm<sup>3</sup>, por lo que la capacidad útil es estimó en 100,7 Hm<sup>3</sup>.

El aliviadero es frontal de descarga libre con ancho de cresta de 20 m. La crecida de diseño fue la milenaria siendo el gasto transitado por el embalse 190 m<sup>3</sup>/s y el nivel de aguas máximas 205 msnm, siendo así 2,70 m la carga máxima sobre la cresta del aliviadero.

La obra de toma es sumergida, rectangular y cercana al estribo izquierdo cruzando su eje bajo el aliviadero. Posee reja en su tope y en sus otras cuatro caras ubicándose la reja superior a cota 186 msnm. La estructura donde se encuentran las rejas es seguida de un túnel de 270 m de longitud, 2,70 metros de diámetro entre el portal de entrada y la chimenea de control, y de sección doble circular de 1,80 metros de diámetro entre la chimenea de control y el portal de salida.

La Figura 1 muestra la cuenca del río Yaracuy hasta el sitio de presa y las Figuras 2, 3 y 4 la presa y la obra de alivio. En el caso de la cresta, ésta se observó invadida por la vegetación que ha crecido sobre ambos espaldones.

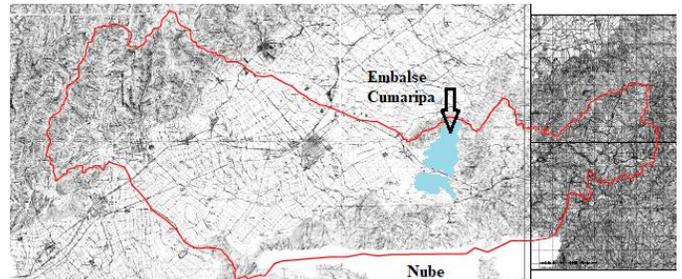


Figura 1: Cuenca del río Yaracuy hasta el Embalse Cumaripa



Figura 2: Presa Ing. Francisco C. Amelinck (2017)



Figura 3: Cresta de la Presa Ing. Francisco C. Amelinck (2017)



**Figura 4:** Aliviadero del Embalse Cumaripa (2017)

Dieciocho años después de la entrada en operación del embalse (1989) la capacidad de almacenamiento se había reducido de manera drástica, estimándose la retención de un volumen de sedimento del orden de los 41 Hm<sup>3</sup>, casi seis veces más que lo calculado durante la etapa de proyecto para toda la vida útil del embalse.

La carretera Nirgua-Chivacoa que pasa por encima del reservorio lo divide en dos sectores y ha propiciado la retención de parte de los sedimentos en el sector más aguas arriba, dejando en uso la porción de embalse que se muestra en la Figura 2. En la Figura 5 se muestra lo que solía ser parte del embalse, aguas arriba del puente de la carretera, y que ha sido ocupado por vegetación dada la deposición de sedimentos.



**Figura 5:** Embalse Cumaripa Aguas Arriba de la Carretera Nirgua-Chivacoa (2017)

En las Figuras 6, 7 y 8 se observa el estado actual (2017) de la porción de embalse localizado aguas abajo de la carretera Nirgua-Chivacoa, donde se encuentran cúmulos de sedimento en los que crecen pastizales. En la Figura 9 se muestra la imagen más reciente de Google Earth (2018) donde se aprecia la dispersión de los sedimentos en el embalse.



**Figura 6:** Presencia de Depósitos de Sedimento en el Embalse Aguas Abajo de la Carretera Nirgua-Chivacoa (2017)



**Figura 7:** Zonas del Antiguo Embalse donde se ha Depositado Sedimento que Favorece el Crecimiento de la Vegetación (2017)



**Figura 8:** Equipos Pequeños de Dragado cuyo Trabajo se Dirige a Permitir el Paso de Agua entre los Dos Sectores del Embalse (2017)



**Figura 9:** Avance de los Depósitos de Sedimento en Ambos Lados de la Carretera Nirgua-Chivacoa (2018)

### III. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA ESTIMAR LA CARGA TOTAL DE SEDIMENTO HASTA UN SITIO DE INTERÉS

La carga total de sedimento comprende a la carga lavada y la carga de material de fondo, expresándose la suma de ambas en t/año, m<sup>3</sup>/año o como módulo o rendimiento unitario en t/km<sup>2</sup>/año o en m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año.

La carga lavada, denominada también pérdida neta de suelos, la compone las partículas de suelo que se desprenden de la cuenca por la acción erosiva de la lluvia y que son descargadas en los cauces de ríos y quebradas para ser transportadas en suspensión hasta, por ejemplo, un embalse. La carga de material de fondo son las partículas de sedimento propias del lecho y que de acuerdo a su tamaño y mineralogía son transportados en suspensión o sobre el fondo como carga de fondo (suspended bed material load and bed load).

En el Trabajo Especial de Grado realizado en la UCAB “Cuantificación de la carga lavada y de material de lecho hasta un sitio de embalse y comparación con valores reportados por batimetrías” (octubre de 2017), se instrumentó la ecuación indicada por Simons y Sentürk [12] con la finalidad de estimar de manera separada la carga lavada anual y la carga de material de fondo también a escala anual, bajo la hipótesis de mayor transporte durante la ocurrencia de eventos de crecidas. La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$A_s = \frac{Q_A (0,01 Y_{100} + 0,01 Y_{50} + 0,02 Y_{25} + 0,06 Y_{10} + 0,33 Y_{2,33})}{0,01 Q_{100} + 0,01 Q_{50} + 0,02 Q_{25} + 0,06 Q_{10} + 0,33 Q_{2,33}} \quad (1)$$

Donde,

As: carga lavada media anual o carga de material de fondo media anual en t/año.

QA: rendimiento líquido anual de la cuenca en m<sup>3</sup>/año.

QT: volumen del hidrograma de crecida para cada período de retorno en m<sup>3</sup>.

YT: carga lavada o carga de material de fondo para cada período de retorno en toneladas (t).

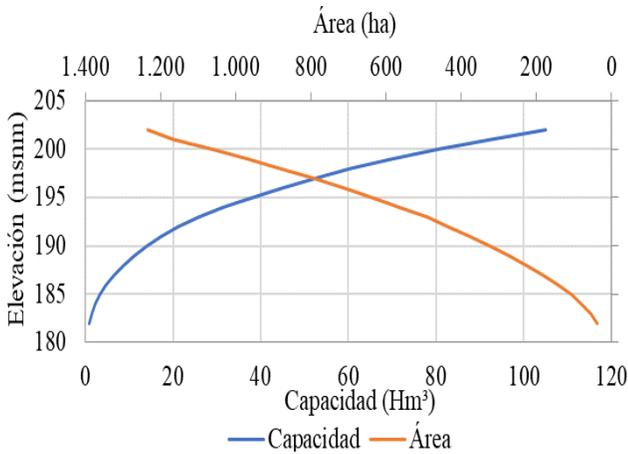
La carga lavada (wash load) y la carga total de material de fondo (bed material load), se calculan para crecidas con frecuencias de 2,33, 10, 25, 50 y 100 años y luego se ponderan de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia incremental.

El cálculo de la carga lavada fue efectuado con la MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), mientras que el cálculo de la carga de material de fondo fue realizado con ecuaciones empíricas de arrastre de sedimentos deducidas a partir de ensayos en ríos o en canales de laboratorio. Entre ellas, se utilizaron: Shields (1936), Einstein (1950), Laursen (1958), Rottner (1959), Graf et al (1968), Engelund y Hansen (1972), Ackers y White (1973), Yang (1979) y Karim (1998). En esos métodos se toman en cuenta distintos parámetros hidráulicos como son el gasto líquido, el tirante y velocidad del agua, la granulometría del material de fondo, la pendiente de la línea de energía, el número de Reynolds, la fuerza cortante generada sobre el material de lecho, el esfuerzo cortante crítico, entre otros. Este conjunto de ecuaciones, y muchas otras, se encuentran en [13].

### IV. INFORMACIÓN RECABADA PARA REALIZAR EL ESTUDIO

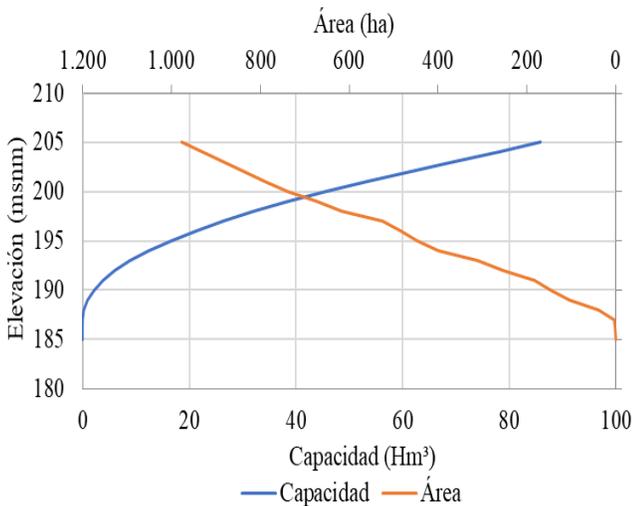
Esta sección tiene la intención de evidenciar la información recopilada para estimar la carga total de sedimento hasta el sitio de interés:

- Climatológica: datos de lluvias medias y máximas para diferentes duraciones. En el caso en estudio se recabaron los registros disponibles en las estaciones Guarabao, Campo Elías, Urachiche, Central Matilde y Los Cogollos.
- Cartográfica: mapas de la cuenca necesarios para trazar la divisoria de aguas de la cuenca y las subcuencas presentes, así como la medición de parámetros físicos como son longitudes y pendientes.
- Operación del embalse: registros del embalse Cumaripa en lo que se refiere a las extracciones para atención de demandas, aliviós, niveles de agua, área del embalse y volumen almacenado. Se contó con esa información a escala diaria.
- Batimétrica: resultados de tres batimetrías realizadas en el embalse de Cumaripa así como la curva elevación-área-capacidad elaborada en la etapa de proyecto, la cual se muestra en la Figura 10.



**Figura 10:** Curva Elevación-Área-Capacidad del Proyecto

Luego de revisar los resultados de las batimetrías realizadas en 1989, 1999 y 2004 se seleccionó la de 1989 puesto que las otras reportan valores, que a juicio de los autores, son dudosos o incompletos. En la Figura 11, se presenta la curva elevación-área-capacidad resultante de la batimetría de 1989.

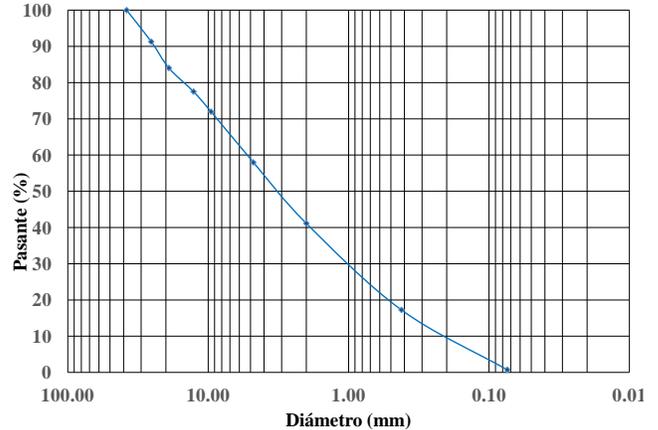


**Figura 11:** Curva Elevación-Área-Capacidad (Batimetría 1989)

Al comparar ambos gráficos se concluye que a cota de aguas normales, el volumen se redujo de 107,75 Hm<sup>3</sup> a 66,75 Hm<sup>3</sup> lo que indica que en tan sólo 18 años se acumularon en el embalse 41 Hm<sup>3</sup> de sedimento, lo que excede en casi seis veces el estimado original para los 100 años de vida útil del embalse.

- Sedimentos: en una visita de campo se tomaron muestras de material de lecho del río Yaracuy en un sitio localizado aproximadamente tres kilómetros aguas arriba de la cola del embalse para su posterior análisis granulométrico según la norma establecida por la ASTM (ensayo ASTM-D422- Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils). La curva granulométrica utilizada se muestra en la Figura 12 y de ella se extrajeron valores de diámetros característicos

como son el d65 (7,0 mm), el d50 (3,2 mm) y el d35 (1,1 mm).



**Figura 12:** Curva Granulométrica del Material de Fondo

- Información temática de suelos, vegetación y usos de la tierra: se recabaron informes de estudios que aportaron información sobre las texturas de los suelos, vegetación existente en la cuenca y usos del suelo. Esta información es fundamental tanto para el estudio de crecidas como para seleccionar valores de los factores que intervienen en la MUSLE.

#### V. INSTRUMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO EN LA CUENCA DEL RÍO YARACUY HASTA EL SITIO DE EMBALSE CUMARIPA

A continuación se resume la metodología utilizada para la estimación de la carga total anual de sedimento con la ecuación referenciada por Simons y Sentürk así como los resultados obtenidos.

1) Trazado de la divisoria de aguas hasta el sitio de presa y la separación de la cuenca en 72 subcuencas a los efectos de considerar la variación espacial de la lluvia, suelos, vegetación y relieve. Sobre ese mapa se localizaron las estaciones pluviográficas y se trazaron los polígonos de Thiessen.

2) Análisis de lluvias extremas mediante el uso de la distribución Tipo I (distribución Gumbel). Con los resultados de ese análisis se diseñaron hietogramas de lluvia total con el método de los bloques alternos para los distintos períodos de retorno que intervienen en la ecuación referenciada por Simons y Sentürk.

3) Parametrización de subcuencas a los efectos de medir valores relevantes como son desniveles, longitudes y pendientes del cauce principal así como estimación de tiempos de viaje en los cauces en los que se requiera el tránsito de hidrogramas afluentes con el objetivo de estimar valores para el coeficiente de almacenamiento (K) que interviene en el método de Muskingum para tránsito hidrológico en ríos.

4) Estimación de abstracciones por infiltración con el método del Número de Curva del antiguo Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS),

por lo que a cada subcuena se le estimó un valor representativo del Número de Curva en función de la textura de los suelos y la vegetación. La textura predominante de los suelos es franco arenoso y en la cuena se tiene la presencia de bosques, pastizales, tierras cultivadas y sectores poblados. El valor promedio del Número de Curva para la cuena del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa se estimó en 63, con valores mínimos y máximos de 47 y 81.

5) Uso del paquete de programas hidrológico HEC-HMS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) a efectos de estimar los hidrogramas de crecidas.

En la Figura 13 se muestran los hidrogramas de crecidas para las distintas frecuencias requeridas, apreciándose que estos exhiben dos picos como resultado de aportes en momentos distintos desde dos cuenas separadas como son la del río Yaracuy y la del el río Sarare que es un tributario que descarga de manera directa y separada al embalse.

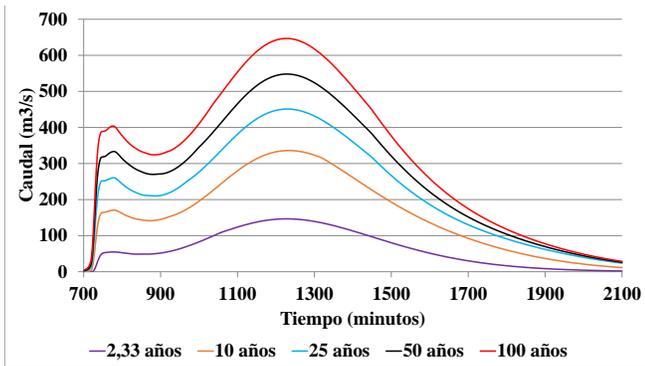


Figura 13: Hidrogramas de Crecidas Afluentes a Cumaripa

En la Tabla I se resumen los gastos máximos, volúmenes máximos y niveles de agua. Debe señalarse que en estas simulaciones se variaron los valores del número de curva a fin de ajustar el hidrograma simulado de la crecida milenaria, a lo contenido en el proyecto de 1971, el cual indica que la descarga de esa crecida por el aliviadero alcanza 190 m³/s para el nivel de aguas máximas de 205,00 msnm.

Tabla I: Gastos Picos, Volúmenes Máximos y Descargas por Alivio del Embalse Cumaripa

T (años)	Crecida afluente		Alivios	Niveles (msnm)
	Q <sub>p</sub> (m³/s)	V (Hm³)	Q <sub>p</sub> (m³/s)	
2,33	147	5,5	12	202,7
5	249	9,7	23	203,0
10	336	13,7	38	203,3
25	451	19,4	61	203,6
50	548	23,6	80	203,9
100	647	27,8	102	204,2
1.000	984	43,0	186	205,1

6) Determinación del volumen y pico de crecida para cada frecuencia en cada una de las subcuenas, a los efectos de ser utilizados en la ecuación de la MUSLE, mientras que con los datos de operación del embalse se determinó el gasto medio anual aportado por la cuena (3,35 m³/s equivalente a 105,65 Hm³/año). El volumen aportado por cada subcuena se obtuvo mediante simple relación del área de cada subcuena con respecto a la superficie total de la cuena.

7) Estimación del factor de erodabilidad de los suelos K, el factor de cobertura vegetal C y el factor topográfico LS para cada una de las subcuenas. En el caso de K, éste varió desde 0,032 hasta 0,046 (Mg ha h)/(ha Mj mm), el factor C varió entre 0,035 a 0,164, y el factor topográfico LS varió entre 0,32 y 37. El factor de prácticas de conservación de suelos y agua (P) se fijó en 1 dado que no se observaron prácticas de conservación de suelos y agua.

8) Estimación de la carga lavada aportada por cada subcuena y para cada evento de crecida con la ecuación de la MUSLE:

$$Y_T = 11,8 (Q q_p)^{0,56} K L S C P \quad (2)$$

Donde,

YT: pérdida neta de suelo en cada subcuena para cada período de retorno (toneladas).

Q: volumen de escurrimiento superficial en cada subcuena y para cada período de retorno (m³).

qp: gasto máximo del hidrograma de crecida en cada subcuena y para cada período de retorno (m³/s).

K: factor de erodabilidad de los suelos.

LS: factor topográfico.

C: factor de cobertura vegetal.

P: factor de conservación de los suelos.

Para la cuena del río Yaracuy hasta el embalse de Cumaripa se estimó una carga lavada media anual de 2.292.698 toneladas. Dicha carga forma parte de la carga suspendida transportada por el flujo.

9) Para la estimación del transporte de material de fondo se utilizó como herramienta de cálculo el programa HEC-RAS también desarrollado por el USACE. En la visita de campo se realizaron mediciones con cinta métrica del ancho del lecho (14 m), la profundidad de las bancas (3,5 m) y se estimaron las pendientes de ellas (2:1 la izquierda y 1:1 la derecha). Con los planos cartográficos se calculó la pendiente de fondo (0,23%). A partir de las observaciones de campo y la revisión bibliográfica se seleccionaron los siguientes valores para el coeficiente de rugosidad de Manning: 0,030 para el lecho, 0,035 para las barrancas y 0,060 para las planicies inundables.

Con el modelo se determinaron los valores de los distintos parámetros hidráulicos que intervienen en las

ecuaciones de transporte de sedimento consideradas, en las cuales solo se usó el gasto líquido que fluye dentro del cauce principal, descartando el caudal sobre las planicies y barrancas.

Cada uno de los hidrogramas de crecidas calculados, se discretizaron en 21 gastos, cada uno de ellos con una cierta duración con respecto a la duración del hidrograma original. Para cada uno de los caudales discretos, se utilizó el HEC-RAS para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos requeridos por cada una de las ecuaciones de transporte de sedimento utilizadas en este estudio. Dichas ecuaciones reportan los resultados en unidades de kg/m/s, es decir carga suspendida o carga de fondo expresada en peso por unidad de ancho de canal y por unidad de tiempo, por lo que se procede a multiplicar el valor reportado por cada ecuación por el ancho de lecho y por la duración de cada uno de los caudales discretos, lo que permite finalmente obtener un gasto sólido en kilogramos o toneladas.

En la Tabla II se presentan los valores de la carga de material de fondo calculada con cada uno de los métodos utilizados, expresados en toneladas para cada evento de crecida, indicándose en la primera columna si la ecuación reporta solo carga de fondo (f) o carga total de material de fondo (t). Adicionalmente, se muestran las cargas medias anuales de material de fondo obtenidas en forma similar a la carga lavada aplicando la ecuación referenciada por Simons y Sentürk

**Tabla II:** Carga de Material de Fondo para cada Evento de Crecida (en miles de toneladas) y Carga Media Anual (en t) según cada Ecuación

Ecuación y tipo	Período de retorno (años)					Carga material de fondo (t/año)
	2,33	10	25	50	100	
Yang (t)	27,1	110,0	134,4	178,9	203,4	841.824
Engelund y Hansen (t)	12,8	63,6	82,6	121,8	132,4	466.375
Laursen (t)	20,0	38,9	43,1	56,2	59,0	417.596
Karim (t)	14,4	38,3	43,2	57,7	60,0	346.445
Graf et al (t)	8,7	38,3	49,6	74,5	80,9	294.598
Rottner (f)	5,5	21,7	26,0	36,7	38,9	167.923
Einstein (t)	3,5	10,9	12,9	17,2	42,2	101.550
Ackers y White (t)	1,6	5,3	6,1	8,2	8,6	43.689
Shields (f)	76,7	363,0	462,8	689,4	762,0	2.702.319

Como se observa el método de Shields reporta valores más elevados que los otros métodos y ello solo considerando la carga de fondo; a continuación de ese método se encuentra la carga estimada con el método de Yang mientras que los métodos de Engelund y Hansen y Laursen reportan valores similares. Los valores más bajos se obtuvieron con los métodos propuestos por Ackers y White, Einstein, Rottner, Graf y Karim.

10) Transformación del volumen de sedimento calculado a partir de la batimetría de 1989 en unidades de peso para lo cual se requirió determinar el peso unitario seco de los sedimentos. Para ello se utilizó la metodología propuesta por Miller y Trask [14]. A tal efecto se estudiaron los niveles de agua embalsada en Cumaripa concluyéndose que los sedimentos se encuentran siempre sumergidos. Por otra parte a partir de la textura franco arenosa de los suelos en la cuenca se seleccionó la siguiente composición de los depósitos de sedimento: arenas 60%, arcillas 10% y limos 30%. A partir de estos valores se determinó un peso unitario seco inicial de  $1.308 \text{ kg/m}^3$  para los depósitos de sedimento y un valor ponderado para K de 54, por lo que el peso unitario seco luego de 18 años, entre la entrada en servicio del embalse y la batimetría de 1989, asciende a  $1.356 \text{ kg/m}^3$ .

Se utilizó la curva de Brune a los efectos de estimar la eficiencia de atrape del embalse obteniéndose un valor de 0,97.

En la Tabla III se presentan los cálculos elaborados que permitieron estimar la carga total media anual de sedimentos afluentes al embalse, la cual asciende a 3.180.236 t/año.

**Tabla III:** Carga Total de Sedimento (en t/año) entre 1971 y 1989 Aportados al Embalse de Cumaripa

Capacidad a nivel de aguas normales (proyecto 1971)	107,75 Hm <sup>3</sup>
Capacidad a nivel de aguas normales (batimetría 1989)	66,81 Hm <sup>3</sup>
Volumen de sedimento retenido entre 1971 y 1989	40,94 Hm <sup>3</sup>
Peso unitario seco depósito de sedimentos	1.356 kg/m <sup>3</sup>
Peso de sedimento retenido entre 1971 y 1989	55,5 x 10 <sup>6</sup> t
Eficiencia de atrape	97 %
Carga de sedimento afluente entre 1971 y 1989	57,2 x 10 <sup>6</sup> t
Período	18 años
Carga anual de sedimento afluente entre 1971 y 1989	3,2 x 10 <sup>6</sup> t/año

11) En la Tabla IV se comparan la suma de la carga lavada anual (2.292.698 t/año) y la carga de material de fondo calculada con cada una de las ecuaciones hidráulicas, con la proveniente del estudio batimétrico de 1989 (3.200.000 t/año), observándose que el método de Yang coincide a efectos prácticos con la batimetría. Las ecuaciones de Engelund y Hansen, Laursen, Karim y Graf difieren entre si menos del 6% y menos del 20% con respecto a los resultados del análisis batimétrico mientras que los métodos restantes se alejan más del 20% del valor referencial.

**Tabla IV:** Comparación de las Cargas Totales Estimadas de Sedimento con el Valor Calculado con la Batimetría de 1989

Ecuación y tipo	Carga total de sedimento (t/año)	Diferencia (%)
Yang (t)	3,134,522	-2,0
Engelund y Hansen (t)	2,759,073	-13,8
Laursen (t)	2,710,294	-15,3
Karim (t)	2,639,143	-17,5
Graf et al (t)	2,587,296	-19,1
Rottner (f)	2,460,621	-23,1
Einstein (t)	2,394,248	-25,2
Ackers y White (t)	2,336,387	-27,0
Shields (f)	4.995.017	+56,1

Los valores estimados con los distintos métodos difieren entre sí de manera significativa. Debe acotarse que cada una de las ecuaciones calcula el transporte de material de fondo a partir de una variable dominante como puede ser el gasto líquido, la velocidad del agua, la pendiente de la línea de energía, el esfuerzo cortante, la potencia de la corriente o la potencia unitaria de la corriente. Es la excepción en este caso, la fórmula de Rottner que corresponde con una ecuación de regresión. Los métodos basados en la potencia de la corriente, como son los de Yang y Engelund y Hansen reportaron los valores más cercanos a lo reportado por la batimetría de comparación. Otro método también sustentado en la potencia de la corriente, como lo es el de Ackers y White, difiere en un 27% del valor reportado por la batimetría. Yang [15] ofrece una comparación y evaluación de varias funciones de transporte de sedimento tanto para canales de laboratorio como para cauces naturales.

## VI. CONCLUSIONES

- Textura franco arenosa de los suelos predominantes en la cuenca tributaria al embalse Cumaripa.
- Tamaños de grano característicos del material de fondo del cauce principal del río Yaracuy, aguas arriba de la cola del embalse Cumaripa: d65 7,0 mm, d50 3,2 mm y d35 1,1 mm.
- Peso unitario seco de 1,36 t/m<sup>3</sup> en los depósitos de sedimento retenidos en el embalse de Cumaripa.
- El proyecto de la presa estimó un volumen de sedimento de 7,05 Hm<sup>3</sup> en 100 años, equivalente a un volumen medio anual de 70.500 m<sup>3</sup> y a un módulo de 162 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año.
- La batimetría de 1989, que abarcó la totalidad del embalse, reporta un volumen de sedimento de 40,94 Hm<sup>3</sup> en 18 años, por lo que el volumen retenido medio anual asciende a 2.274.444 m<sup>3</sup>/año, equivalente a un módulo de 5.228 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año o 7.090 t/km<sup>2</sup>/año.

- La carga lavada tributada al embalse Cumaripa se estimó en 2.292.698 toneladas anuales equivalente a un módulo de producción de sedimento de 5.270 t/km<sup>2</sup>/año (3.875 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año).
- La carga lavada contribuye con el 73% del sedimento que anualmente es transportado hasta el embalse de Cumaripa, lo que equivale a un volumen de 29,9 Hm<sup>3</sup> en el lapso 1971-1989.
- El método de Yang (1979) deducido para arenas permitió estimar una carga de material de fondo de 841.824 t/año, la cual al ser adicionada con la carga lavada resulta en una carga total anual de sedimento de 3.134.522 toneladas, resultando así un módulo de 7.206 t/km<sup>2</sup>/año (5.298 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año).
- Como era de esperarse las cargas de material de fondo estimadas con distintas ecuaciones de transporte difieren de manera sustancial. Esas diferencias se pueden atribuir a las distintas condiciones con las que fueron desarrolladas. Por lo tanto, se puede concluir que no todos los métodos de transporte de sedimentos arrojan resultados similares de carga de material fondo para un mismo río, y más bien, existe la necesidad de comparar entre una amplia variedad de ecuaciones para decidir sobre el que mejor se ajuste a cada caso particular.
- La disponibilidad de mediciones de gastos sólidos o la existencia de embalses con batimetrías realizadas en distintos años y en cuencas cercanas son elementos imprescindibles para la estimación de los aportes de sedimento que se esperan ocurran durante la vida útil de un embalse que se encuentre en etapa de estudio y proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] J. Williams and H. Berndt, *Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology*, Transactions American Society of Agricultural Engineers, vol. 20, pp. 1100-1104, 1977.
- [2] A. Shields. *Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement*, California Institute of Technology (translate from German), 1936.
- [3] H.A. Einstein, *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*, Technical bulletin no. 1.026, United States Department of Agriculture, 1950.
- [4] E. Laursen, *The Total Sediment Load on Streams*, Journal of the Hydraulics Division, vol. 84, no. 1, pp. 1530-1-1530-36-2060, 1958.
- [5] J. Rottner, *A Formula for Bed-Load Transportation*, La Houille Blanche, vol. 14, no. 3, pp. 285-307, 1959.
- [6] W. Graf and E. Acaroglu, *Sediment Transport in Conveyance Systems; Part I, a Physical Model for Sediment Transport in Conveyance Systems*, Hydrological Sciences Journal, vol. 13, no. 2, pp. 20-39, 1968.
- [7] F. Engelund and E. Hansen, *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Teknisk Forlag, 1972.

[8] P. Ackers and W. White, *Sediment Transport: New Approach and Analysis*, Journal of the Hydraulics Division, vol. 99, no. HY11, pp. 2041-2060, 1973.

[9] C. Yang, *Unit Stream Power Equations for Total Load*, Journal of Hydrology, vol. 40, pp. 123-138, 1979.

[10] F. Karim, *Bed Material Discharge Prediction for Nonuniforms Sediments*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 124, no. 6, pp. 597-604, 1998.

[11] O. Juresa, F. Ovalles and J. Martínez, *Cuantificación de la Carga Lavada y de Material de Lecho hasta un Sitio de Embalse y Comparación con Valores Reportados por Batimetrías*, Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica Andrés Bello, no publicado, 2017.

[12] D. Simons and F. Sentürk, *Sediment Transport Technology*, Water Resources Publications, 1992.

[13] Garcia, M. (editor), *Sedimentation engineering-Manual 110*, American Society of Civil Engineers, 2008.

[14] United States Bureau of Reclamation, *Design of Small Dams*, 1997.

[15] C.T. Yang, *Sediment Transport-Theory and Practice*, McGraw-Hill, 1996.