

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA ACOMODACIÓN DE LOS SEDIMENTOS GRUESOS EN EMBALSES COLOMBIANOS

Yuli Carolina Velandia Roncancio, I.C., M. Eng. y Carlos Eduardo Cubillos Peña I.C., M.Sc.

Egresada Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, Docente Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

E-mail: ycvelandiar@unal.edu.co, cecubillosp@unal.edu.co

## Introducción

Durante el siglo XX, la construcción de presas para formar reservorios de agua se consideró una práctica importante que en Colombia, permitió desarrollar proyectos de gran tamaño como Chivor, Guavio, Betania, Salvajina, Prado y Urrá, entre otros, la mayoría dimensionados considerando que los sedimentos avanzarían hacia la presa ocupando el denominado volumen muerto del embalse. El estudio de la distribución longitudinal de los sedimentos en el interior de los embalses ha mostrado que una gran parte de los sedimentos se depositan en la cola del embalse, formando depósitos tipo delta, disminuyendo así el volumen útil del embalse.

En el presente análisis se consultaron en la literatura técnica 11 metodologías empíricas, usadas en Estados Unidos, Suráfrica, China, Pakistán e Irán, para predecir la acomodación longitudinal de los sedimentos gruesos en embalses, las cuales se aplicaron a tres casos colombianos para evaluar su validez: Betania (vol. total 1989 Hm<sup>3</sup>) en el departamento del Huila, el cual inició su operación en 1987; Prado (vol. total 1150 Hm<sup>3</sup>) en el departamento del Tolima, que inició operación en 1969 y La Esmeralda (vol. total 758 Hm<sup>3</sup>) en Boyacá, el cual inició operación en 1975. Los métodos empíricos se aplicaron para diferentes épocas desde el inicio de su operación, y se comparó con los patrones de depositación realmente observados mediante batimetrías realizadas en el interior de los embalses.

En la presente ponencia se describe el fenómeno de la depositación tipo delta, se indican las metodologías consultadas y los resultados obtenidos tras la comparación de la configuración del depósito predicho mediante las metodologías ensayadas, con la deducida de las batimetrías en los tres embalses; y se presentan las conclusiones obtenidas.

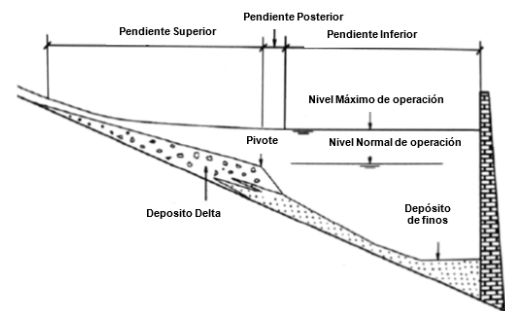
## La depositación de sedimentos en embalses

Los reservorios tienden a ser trampas de sedimentos muy eficientes (Bureau of Reclamation, 2006), siendo prácticamente inevitable que ocurra la sedimentación de embalses construidos en cauces naturales (Gottschalk, 1964). En efecto, la presa para embalse constituye un obstáculo al flujo, por lo cual aumenta su profundidad y reduce su velocidad y turbulencia. Al ser el abastecimiento sedimentológico mayor a la capacidad de transporte, los sedimentos gruesos empiezan a depositarse de forma inmediata en la cola del embalse, mientras que los sedimentos finos son transportados hacia adentro del reservorio (Morris, 2010). De acuerdo con análisis realizados en una gran cantidad de embalses de China, la Organización Meteorológica Mundial, reporta tres tipos de perfil longitudinal del depósito, denominados: delta, cuña y barra (WMO, 2003). Morris (2010), adicionalmente, reporta la distribución longitudinal tipo uniforme; ambas referencias coinciden en que estas formas geométricas del depósito dependen de: la composición y diámetro de la carga de sedimentos que ingresa al reservorio, la capacidad de almacenamiento del embalse, de la geometría y del modo de operación del reservorio.

## El delta

Particularmente, los depósitos tipo delta se forman en reservorios en los que la relación de la capacidad de almacenamiento con respecto a la escorrentía anual entrante es grande, el nivel del embalse se mantiene alto y la carga de sedimento que entra al embalse es relativamente gruesa (diámetro > 0.062 mm), depositándose rápidamente en la entrada del embalse.

Tal como se muestra en la **Figura 1**, Fan & Morris (1992<sup>a</sup>) citado por Morris (2010) describen que un delta está definido por una pendiente superior y una pendiente posterior, las cuales cambian en un punto denominado pivote; las partículas de sedimento en la pendiente superior son más gruesas que en la pendiente posterior, y la elevación de la zona de transición entre la pendiente superior y la pendiente posterior depende de las reglas de operación del embalse.



**Figura 1.** - Zonas de depositación longitudinal en un reservorio. Fuente: Adaptado de Morris, 2010.

## Metodología para el análisis comparativo de la predicción empírica de distribución longitudinal de los sedimentos depositados en embalses

Se relacionan las metodologías consultadas y evaluadas: 9 para la pendiente superior y 2 para la pendiente posterior del delta. La selección de los casos (depósitos y embalses) estuvo condicionada principalmente a la disponibilidad de información topobatimétrica, hidrológica y sedimentológica, requerida para aplicar cada metodología. Una vez obtenida, se procedió a realizar la caracterización de los embalses. Se compararon a nivel numérico las pendientes de los perfiles con las predichas mediante las diferentes metodologías aplicadas, identificando cuál de ellas permitió obtener mejor ajuste con respecto al comportamiento medido según su evolución temporal.

## Resultados

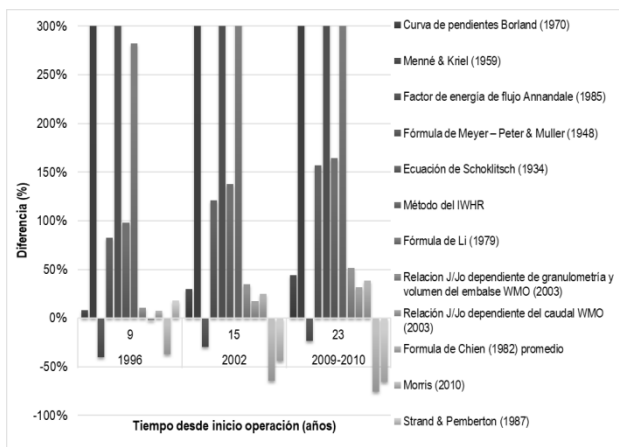
Las figuras 2 a 4 muestran los resultados de la comparación para cada embalse. En las abscisas se indica el año en que se realizó cada una de las batimetrías, y el tiempo desde el inicio de operación; en las ordenadas, la diferencia porcentual entre valores medidos de pendiente y resultados obtenidos por cada metodología.

**Tabla 1.** – Metodologías empíricas para predicción de la distribución longitudinal de la deposición de los sedimentos en embalses.

| Pendiente Superior   |  |
|--|--|
| <b>Método de curva de pendientes:</b> Borland (1970)<br><b>Método gráfico:</b> Pendiente original Vs Pendiente superior  | <b>Menné &amp; Kriel:</b> Menné & Kriel (1959)<br><b>Método gráfico:</b> Factor de forma (Longitud del reservorio / ancho promedio) Vs Pendiente superior / Pendiente original |
| <b>Factor de energía del flujo:</b> Annandale (1985)<br><b>Método gráfico:</b> Factor de energía del flujo Vs Pendiente superior                               | <b>Fórmula de Meyer – Peter &amp; Müller (1948)</b><br>$S_p = K \frac{Q^{1/2} n_s}{(d_{50})^{3/2} d}^{1.2}$  |
| <b>Ecuación de Schoklitsch (1934)</b><br>$s = \left( \frac{0.00021 d_B}{Q} \right)^{1.4}$  | <b>Chien (1982)</b><br>$S_p = A \frac{S_s^{1.4} D_{50}^{0.5} d_{50}^{1.3}}{(Q/B)^{0.2}}$   |
| <b>Fórmula de Li</b><br>$J = 0.00455 \left[ \frac{p}{Q} \right]^{0.5} D_{50}^{-0.59}$  | <b>Método del IWHR</b><br>$J = 1.28 \times 10^{-4} \left( \frac{d_{50}}{q^{0.75}} \right)^{0.335}$   |
| <b>Relaciones J/Jo</b><br>$J / J_o = 19.5 \left[ \frac{d_{50}}{D_{50}} \right]^{0.1} \left( \frac{1}{H'} \right)^{0.117}$ $J / J_o = 0.79 (H' Q / V_o)^{0.17}$ |  |
| Pendiente posterior  |  |
| <b>Strand &amp; Pemberton:</b> Strand & Pemberton (1987)<br>6.5 veces la pendiente superior.   | <b>Morris:</b> Morris (2010)<br>1.6 veces la pendiente original  |

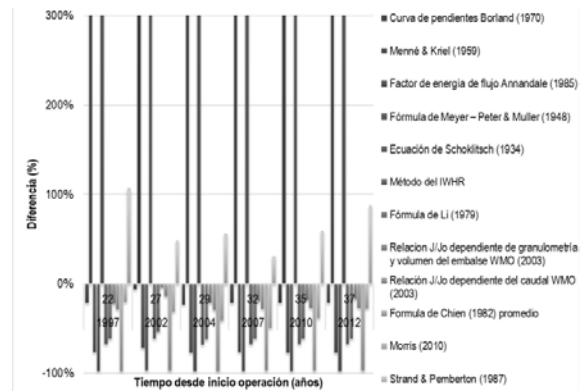
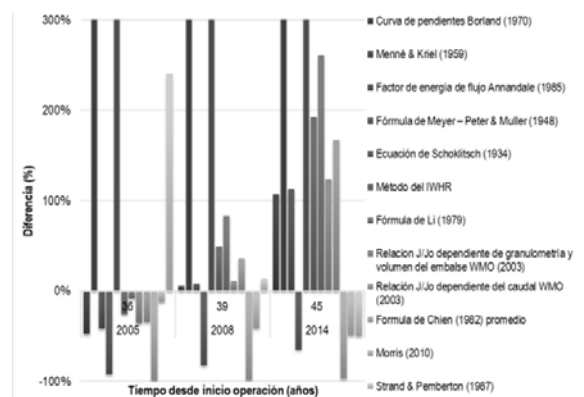
Se encontró que el método de la curva de pendientes de Borland (1970) y las dos relaciones J/Jo mostradas en WMO (2003), son los que mejor predicen la pendiente superior en los embalses analizados, mostrando diferencias hasta del 50% con respecto a las pendientes medidas.

Particularmente en Betania los métodos de factor de energía de flujo de Annandale (1985) y la fórmula de Chien (1982) también mostraron buen resultado. Los métodos de Chien (1982) y la fórmula de Meyer – Peter & Müller (1948) subestimaron la pendiente superior en La Esmeralda y en Prado, con diferencias superiores al 50%. Por su parte, los métodos de Menné & Kriel (1959) y Schoklitsch (1934) sobreestimaron los valores en todos los casos y además mostraron las mayores diferencias. Como particularidad, la fórmula de Meyer – Peter & Müller (1948) y los métodos de IWHR y Li (1979), mostraron una predicción opuesta en dos embalses: subestimaron en La Esmeralda y sobreestimaron en Betania.

**Figura 2.-** Comparación de resultados embalse Betania.

En cuanto a los criterios para estimar la pendiente posterior, el de Morris (2010) muestra buenos resultados en La Esmeralda y en Prado, y subestima los valores en Betania.

Por su parte, el de Strand & Pemberton (1987), en algunas épocas muestra buenos resultados y en otras sobreestima los valores, especialmente en La Esmeralda.

**Figura 3.-** Comparación de resultados embalse La Esmeralda.**Figura 4.-** Comparación de resultados embalse Prado.

## Conclusiones y recomendaciones

Las pendientes del delta evolucionan con el tiempo, y ninguno de los métodos utilizados contempla esta variable dentro la formulación consultada y utilizada en este trabajo. Lo anterior se considera una limitante de todas las metodologías consideradas como herramienta predictiva. No obstante que se sugieren las metodologías de Borland (1970) y las relaciones J/Jo señaladas en WMO (2003) para estimar la pendiente superior de una formación tipo delta, así como el método de Strand & Pemberton (1987) para estimar la pendiente posterior, su uso solo es recomendado en etapas de conceptualización de proyectos que involucren embalses.

## Referencias bibliográficas

- Annandale, G.** (1985). "Estimating slopes of sediment deposited in storage reservoirs". *Scientific Basis for Water Resources Management (Proceedings of the Jerusalem Symposium, September 1985)*. IAHS Publ. no. 153. Johannesburg, South Africa,
- Borland, W. M.** (1970) *Reservoir sedimentation in River Mechanics* edited by Shen H. W. Water Resources Publications. Chapter 29.
- Bureau of Reclamation.** (2006). *Erosion and Sedimentation Manual*. U.S. Department of the Interior. Denver, Colorado. Chapter 2: Erosion and reservoir sedimentation.
- Gottschalk, L.** (1964). *Sedimentation Part I: Reservoir sedimentation, en Handbook of applied Hydrology*, Edited by Ven Te Chow, McGrawHill. United States, Chapter 17.
- Morris, G.L. and FAN, J.** (2010). *Reservoir Sedimentation Handbook*, McGraw-Hill Book Co., New York.
- WMO - World Meteorological Organization.** (2003). *Manual on Sediment Management and Measurement, WMO N° 948*. ISBN: 92-63-10948-6. Geneva, Switzerland. Chapter 5: Reservoir sedimentation and impact on river processes.