

## **PREDICCIÓN DE LA SEDIMENTACIÓN DE EMBALSES CON MODELOS UNIDIMENSIONALES TRADICIONALES**

**Pablo Spalletti, José D. Brea**

Programa de Hidráulica Fluvial - Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua (INA)

CC21 Aeropuerto Ezeiza (CP 1802) – Te: 011-44804500

E-mail: pspallet@ina.gov.ar - dbrea@ina.gov.ar

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se muestra la aplicación de modelos unidimensionales tradicionales, en particular el HEC6, al estudio de sedimentación en embalses.

Se presenta la aplicación al caso del lago Mead, producto de la construcción de la presa Hoover en el sudoeste de los EE.UU, por contar con una base de información muy completa, tanto de series temporales y relevamientos batimétricos como de datos sedimentológicos.

A partir de la implementación llevada a cabo puede apreciarse una adecuada capacidad de predicción de los procesos de sedimentación del embalse analizado, lo que pone de manifiesto que si el problema lo permite, la utilización de modelos sencillos puede ser una alternativa frente a modelos de mayor complejidad, en los que en general son necesarios datos de difícil disponibilidad.

### **ABSTRACT**

In the present paper the application of traditional one-dimensional models, in this case the HEC6, to the study the sedimentation in reservoirs, is shown.

The application to the case of the Mead lake, product of the construction of the Hoover dam in the southwest of the U.S.A., appears. This case was selected due to the very complete information data base, as much of temporary series, like of bathymetric measurements and sedimentological data.

From the carried out implementation, a suitable capacity of prediction of the processes of sedimentation of the analyzed dam can be appraised, which shows that if the problem allows it, the use of simple models can be an alternative in front of models of greater complexity, in which in general they are necessary data of difficult availability.

### **INTRODUCCIÓN**

Con el objeto de evaluar el grado de ajuste que puede obtenerse en estudios de sedimentación de embalses mediante la aplicación de programas de cálculo tradicionales, se implementó el modelo HEC-6 para un caso en el que se contó con una base de datos completa respecto a la información de base para utilizar como condición de borde de las simulaciones, y de otros parámetros que permitieron caracterizar la evolución temporal del lecho, tanto respecto a la cota como a las características granulométricas del material que lo conforma.

Como caso de estudio se consideró la sedimentación en el lago Mead, producto de la construcción de la presa Hoover en el sudoeste de los EE.UU. La inspección del lago Mead realizada por Lara y Sanders (1970) ha dado lugar a un informe técnico con suficiente grado de detalle como para poder realizar el análisis de aptitud de la herramienta de cálculo, ya que en dicho trabajo se pueden encontrar datos prácticamente continuos durante un período de unos 30 años.

Probablemente, el modelo de dominio público más conocido y utilizado para el presente problema es el HEC-6. El modelo, desarrollado con el objeto de estudiar erosión y sedimentación en ríos y reservorios, es unidimensional pero permite analizar redes de canales. Está diseñado para simular cambios en perfiles fluviales sobre períodos de tiempo prolongados, aunque puede aplicarse a eventos de crecidas individuales, siendo el registro de flujo entrante, dividido en una secuencia de flujos estacionarios de amplitud y duración variables.

### **DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE DEL LAGO MEAD**

La inspección del lago Mead de Lara y Sanders (1970) constituye posiblemente uno de los más completos estudios de campo cuyo informe está disponible. Dicho informe es el resultado de varios años de análisis de los datos recogidos, y reproduce una gran cantidad de características físicas y químicas del reservorio y sus sedimentos.

El lago Mead se trata de un reservorio artificial, producto de la construcción de la presa Hoover, en el año 1935, sobre el río Colorado, que es el principal curso de agua del sudoeste norteamericano, drenando una superficie de 620.000 km<sup>2</sup> a través de 7 estados, y desemboca en el Pacífico a través del golfo de California. El embalse se encuentra aguas abajo del parque nacional del Gran Cañón.

En 1963 se cerró la presa del Cañón Glen, construida unos 600 km aguas arriba de la presa Hoover, dando lugar al lago Powell. Uno de los objetivos principales de esta obra fue el de prevenir la colmatación del lago Mead, llevándose a cabo los relevamientos del año 1963/64 sobre este último, para determinar la situación al momento del cierre de la nueva presa.

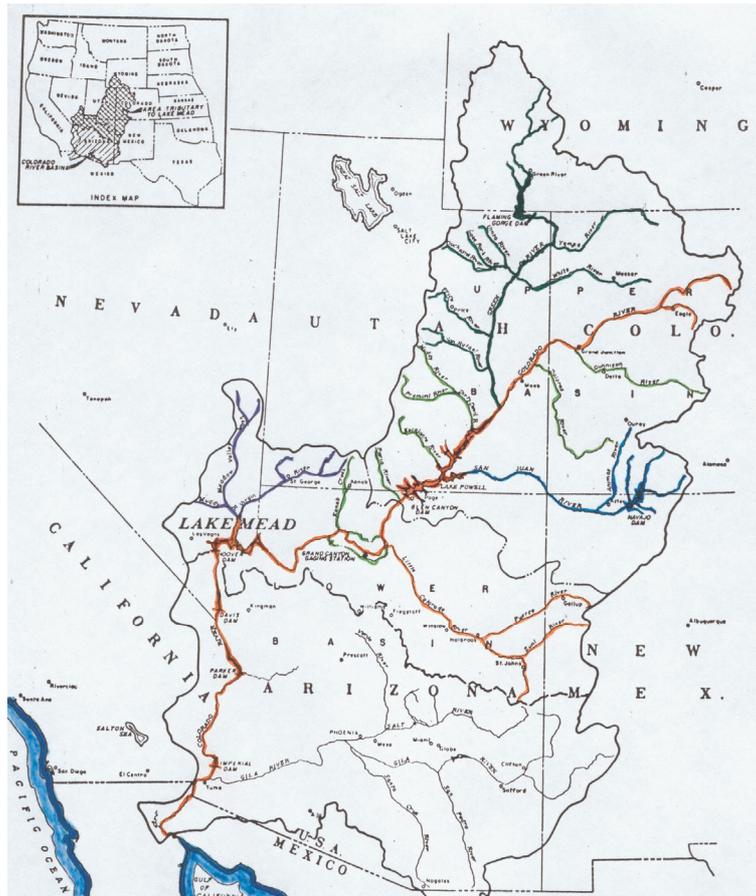


Figura 1.- Cuenca del río Colorado (EE.UU.).

### Series temporales de datos

La base de datos cuenta con mediciones del caudal medio mensual a través del Gran Cañón. La Figura 2 muestra los valores para el período 1935-1964. Se observa un ciclo anual con máximos en junio (entre 400 y 2.600  $m^3/s$ ) y mínimos en diciembre/enero (menos de 100  $m^3/s$ ). En la Figura 3 se muestra un análisis de la serie de caudal, indicando que el 30% del tiempo el caudal es menor a 175  $m^3/s$ , y durante las dos terceras partes del tiempo es inferior a los 320  $m^3/s$ . El caudal supera los 1200  $m^3/s$  solamente el 10% del tiempo, y el valor medio para la serie completa es de 436  $m^3/s$ .

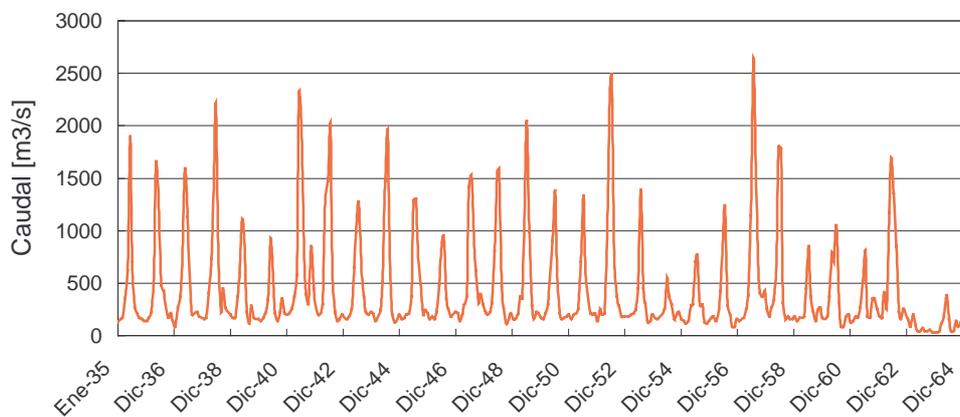


Figura 2. - Caudal medio mensual a través del Gran Cañón.

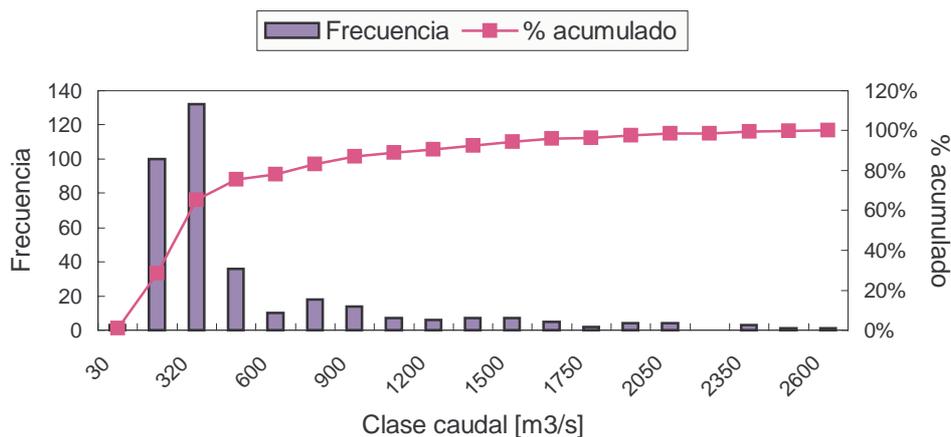


Figura 3. – Histograma para la serie de caudal medio mensual.

La Figura 4 presenta el nivel de embalse para el período simulado. La serie muestra un transitorio del llenado del vaso de unos 3 ½ años, con una profundidad inicial en la presa de 50 m. Considerando la serie de 30 años, el rango de variación de nivel alcanza los 100 m. Para el período de régimen de operación del embalse (considerado desde enero de 1939) el nivel medio es de 354.3 msnm, oscilando entre los niveles 330.7 y 372.5msnm, es decir, una excursión máxima en todo el período de 41.8 m. La excursión anual del nivel de embalse oscila entre 10 y 20 m, aproximadamente.

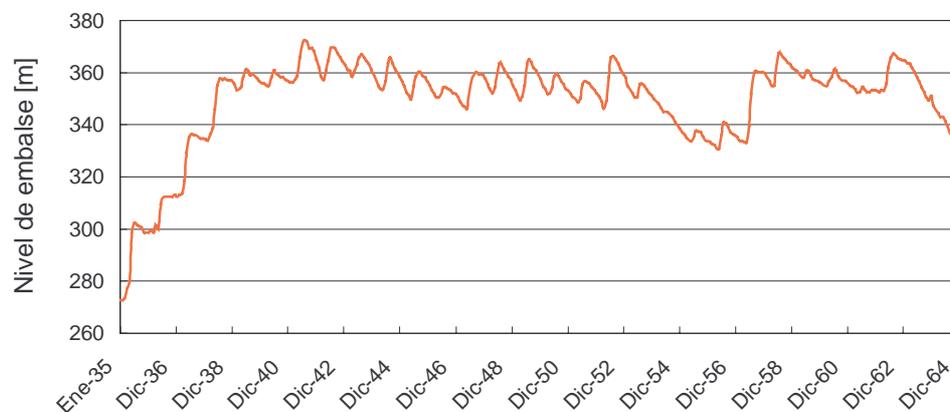


Figura 4. – Nivel de embalse en la presa Hoover.

La información hidrológica disponible incluye los caudales medios diarios máximo y mínimo para cada mes, el área del espejo de agua al final de cada mes, el volumen disponible al final de cada mes y la descarga media mensual de la presa Hoover.

También se informa la tasa media mensual de evaporación, con un promedio para el período 1952-1964 de 33 m<sup>3</sup>/s. Los valores máximo y mínimo son de 66 y 9 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Entre 1948 y 1949 se realizó una inspección topográfica del lago Mead, con el objeto de determinar la reducción en la capacidad del reservorio, debida al proceso de sedimentación.

En esos momentos, el río podía transportar 500.000 toneladas diarias de sedimentos a través del Gran Cañón.

La Figura 5 muestra la serie de caudal sólido suspendido registrada en la estación del Gran Cañón, unos 430 km aguas arriba de la presa Hoover, es decir, alrededor de 280 km aguas arriba de la sección de entrada del modelo. La carga está expresada en millones de toneladas al mes, indicando la enorme cantidad de sedimento transportado por el río Colorado. Durante el período comprendido entre noviembre de 1942 y septiembre de 1943 el caudal sólido no fue medido, razón por la cual se tomaron los valores del mismo periodo durante los años 1944 y 1945 como representativos.

Para la serie completa de 30 años, la cantidad total de sedimento pasando a través del Gran Cañón alcanza los 3171 millones de toneladas, con un promedio anual de 106 millones de toneladas (8.8 millones de toneladas mensuales). El máximo registrado alcanza los 95 millones de toneladas mensuales, con mínimos del orden de 250.000 toneladas al mes. En la figura 2.11 se muestra un histograma de la serie de caudal sólido.

El análisis de la serie indica que durante los primeros 15 años se transportaron las dos terceras partes de la carga total, y en los últimos 15 años solamente un tercio. Es decir, en la primera etapa el caudal sólido total duplicó al de la segunda mitad de la serie.

Lara y Sanders (1970) indican que otros tributarios menores contribuyen a la carga de sedimento que ingresa al lago Mead aguas abajo del Gran Cañón, aunque la cuenca de aporte no es demasiado significativa. Por ejemplo, su estimación de que el 10% de la carga suspendida no está medida es consistente con la tasa media anual de sedimentación en el lago. Es decir, las cargas representadas en la Figura 5 más un 10% debido a la producción de sedimento en la subcuenca entre el Gran Cañón y el lago, son suficientes para explicar el volumen neto sedimentado (teniendo en cuenta que la eficiencia de atrape de sedimento del lago es de casi el 100%).

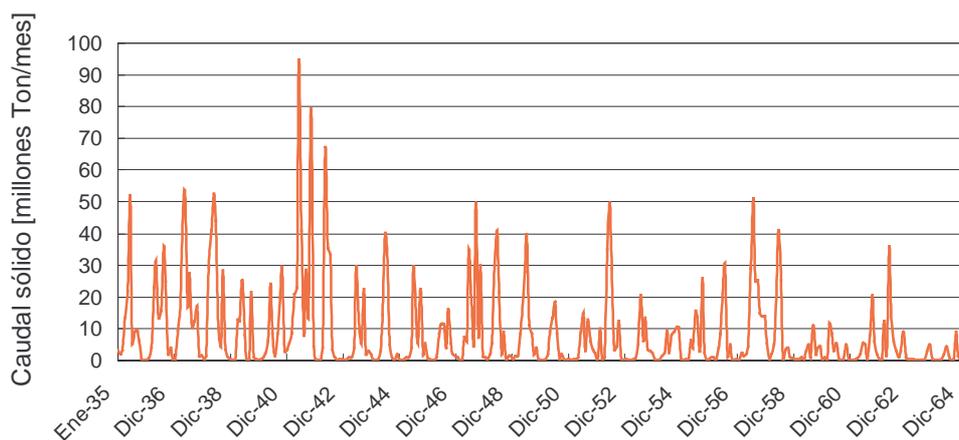


Figura 5. – Caudal sólido medio mensual.

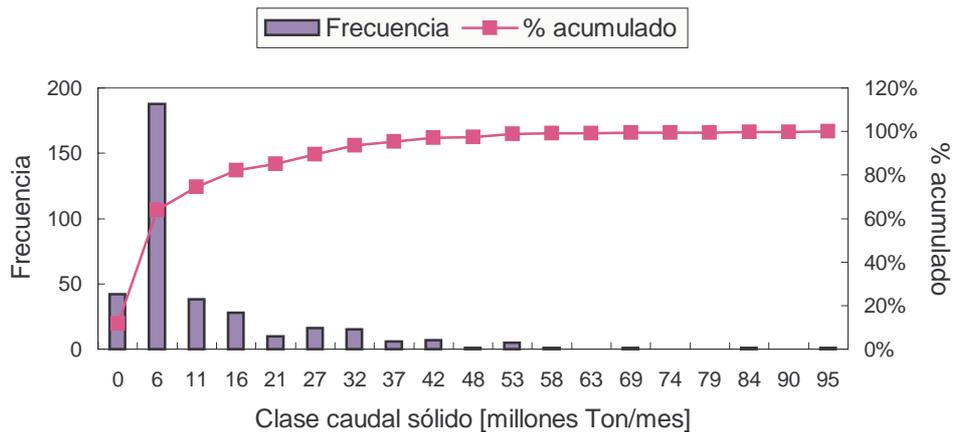


Figura 6. – Histograma para la serie de caudal sólido medio mensual.

### Datos batimétricos

Al momento del cierre de la presa (1935), como así también durante las campañas de 1948/49 y 1963/64, se relevó el perfil longitudinal del río Colorado, desde unos 3 km aguas arriba del cañón Bridge, en Arizona, hasta la presa Hoover, en Nevada.

La información batimétrica se completa con una serie de secciones relevadas a lo largo del lago. Las secciones fueron medidas en el año 1935 y durante los relevamientos de 1948/49 y 1963/64. Para el tramo del lago modelado se cuenta con una docena de secciones.

### Datos sedimentológicos

Durante el relevamiento de 1963/64 se tomaron muestras de sedimento de fondo en una serie de posiciones a lo largo del embalse, las cuales se indican en la Figura 7. De ellas, las indicadas con los números 1 a 8, y como *Drill Hole # 1*, están dentro del tramo modelado. El análisis de datos se llevó a cabo con estas muestras.

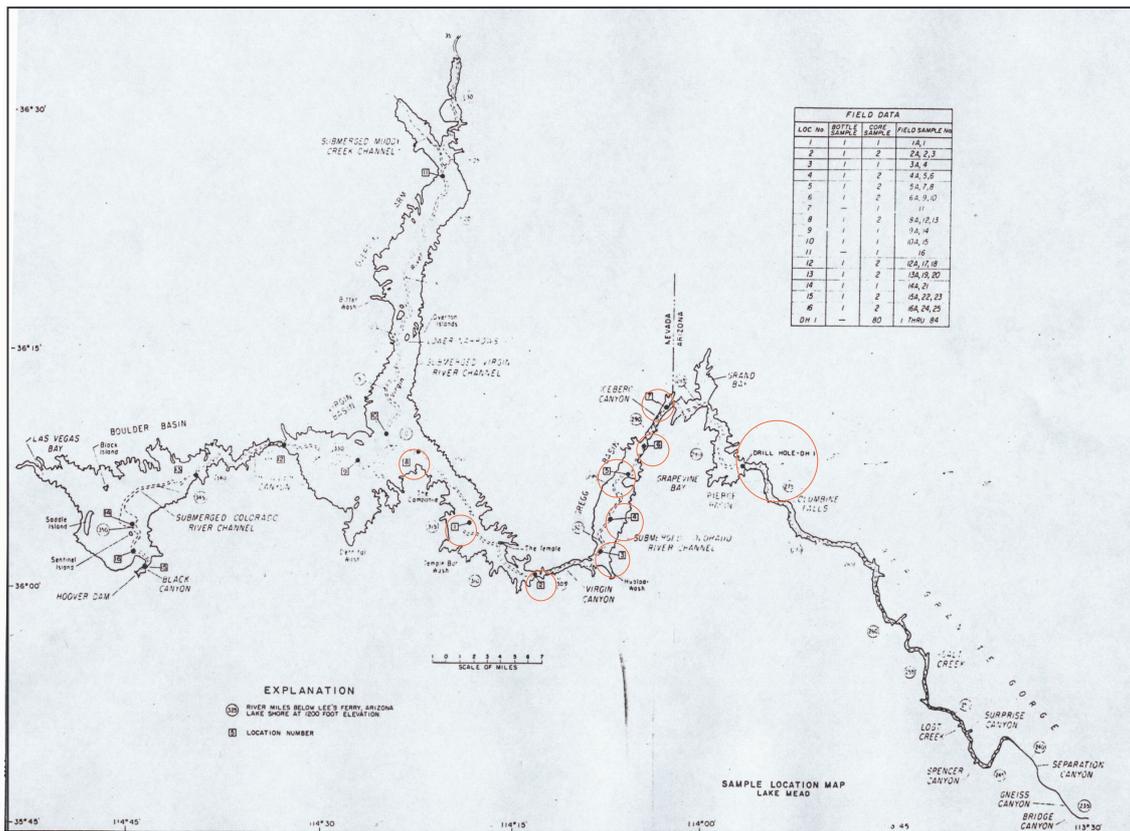


Figura 7. – Posiciones de obtención de muestras sedimentarias de fondo.

La composición mineralógica media de las muestras analizadas se presenta en la Tabla 1. La proporción de materia orgánica en esas muestras varió entre 0 y 1.5%.

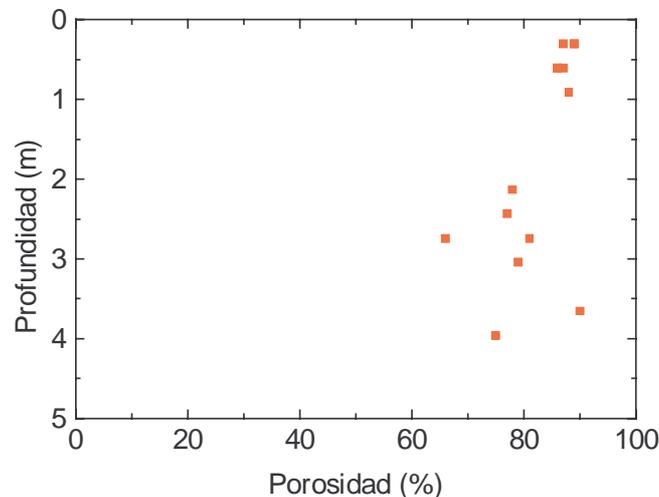
Tabla 1. - Composición mineralógica de los sedimentos depositados en el lago Mead.

Material	Rango
Cuarzo	25 al 30 %
Feldespatos	3 al 5 %
Calcita	12 al 13 %
Dolomita	6 al 10 %
Caolinita	5 al 8 %
Arcilla (Ilita-Montmorilonita)	30 al 40 %

En esos lugares se tomaron muestras a poca profundidad. Desde la Bahía Grand hasta la intersección con el brazo Overton los depósitos sedimentarios están compuestos esencialmente de limo fino y arcilla. Los diámetros medios registrados en estas ocho posiciones van desde los 40  $\mu\text{m}$  a valores inferiores a 1  $\mu\text{m}$ , y la presencia de arena es casi imperceptible.

El análisis de las muestras obtenidas por Lara y Sanders (1970) indica que algunas propiedades físicas del sedimento depositado (contenido de humedad, peso seco específico, porosidad) presentan una estratificación en la vertical. En el informe mencionado se observan una serie de figuras indicando la presencia de una capa superficial, de alrededor de 1 m de profundidad, con propiedades diferentes a las de las capas más profundas, las cuales exhiben cierto grado de uniformidad.

La Figura 8 presenta la porosidad media de una serie de muestras, en función de la profundidad. En la capa superficial, los valores varían entre 85 y 90%, mientras que por debajo caen dentro del rango 65 a 90%.



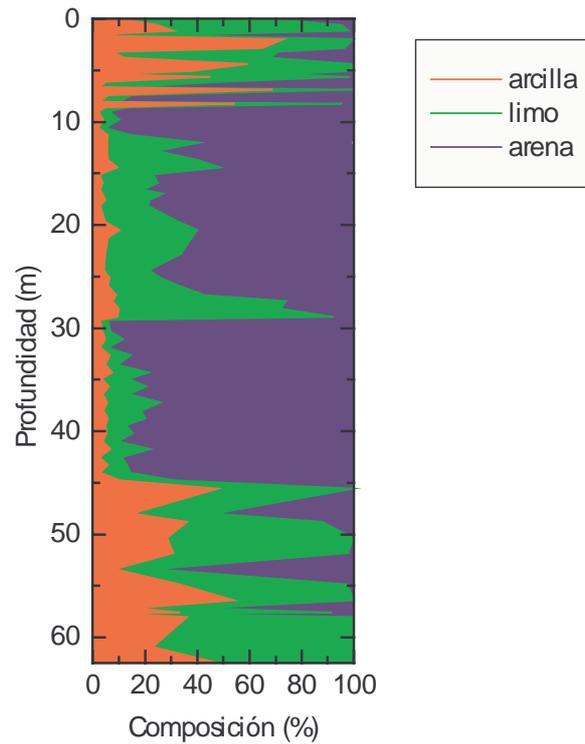
**Figura 8.** – Porosidad media en función de la profundidad para muestras de fondo compuestas por sedimentos finos.

De acuerdo a lo informado por Lara y Sanders (1970), en los estratos de sedimentos compuestos de limo y arcilla la consolidación se alcanza rápidamente

La estratificación por diámetros de partículas se presenta más variable. El patrón de estratificación informado por Lara y Sanders (1970) muestra espesores que van desde unos pocos centímetros a metros, presentando una recurrencia de capas de arcilla, limo y, eventualmente, arena. Se supone que tal variación refleja el carácter cambiante de los sedimentos entrantes, y los efectos de la variación del nivel del embalse.

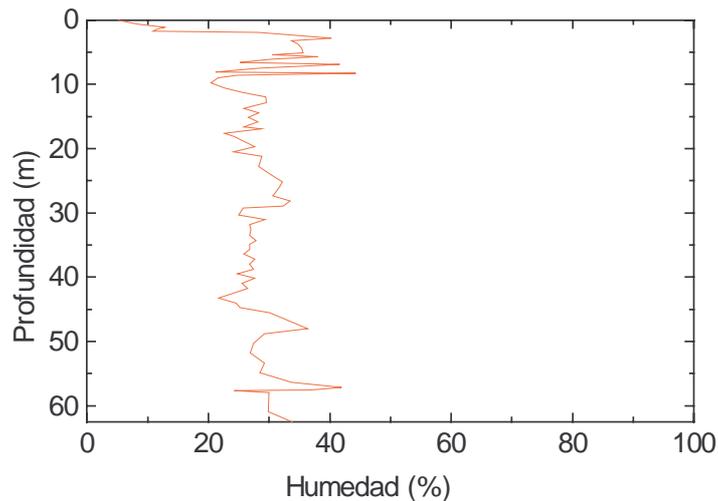
Por otro lado, en la posición indicada como *drill hole # 1* en la Figura 7 (progresiva 447 km), sobre el cuenco de Pierce, se realizó una perforación hasta unos 62.5 m de profundidad, colectándose y analizándose muestras en distintos niveles. La perforación se llevó a cabo en la posición aproximada del punto superior del frente del delta al año 1948. Desde el punto más profundo analizado hasta el cauce original al año 1935 restan unos 17 metros: esta porción quedó, entonces, sin relevar.

De entre los diversos resultados del análisis del material proveniente de la perforación, la Figura 9 presenta la composición del lecho de acuerdo al tipo de grano, en función de la profundidad. Se observa que aparece un patrón de estratificación variable y que, en este caso, el contenido de arena es significativo. Esto último confirma que el lecho del delta está constituido primariamente de ese tipo de material.



**Figura 9.** – Composición del lecho del delta por tipo de sedimento, en función de la profundidad. Perforación en posición “drill hole # 1”

La Figura 10 indica que el contenido de humedad es aproximadamente uniforme en la profundidad (variando entre el 20 y el 40%) a excepción de una delgada capa superficial. La porosidad también presenta un patrón relativamente uniforme en la vertical, con valores entre el 40 y 55%, típicos de la arena (Figura 11).



**Figura 10.** – Contenido de humedad en función de la profundidad.

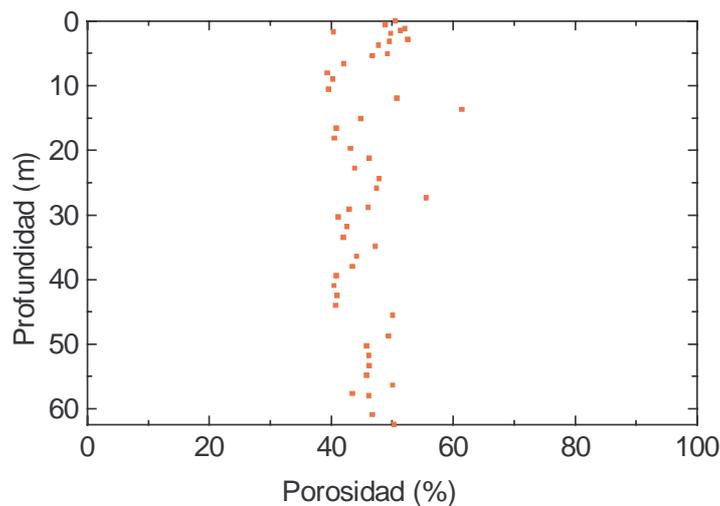


Figura 11. – Porosidad media en función de la profundidad.

La Figura 12 muestra el diámetro medio de las partículas del fondo a distintas profundidades. Se observa que en la mayoría de los casos los valores caen dentro del rango de las arenas, con presencia de finos en la zona inferior de la perforación, y en la superficie del depósito.

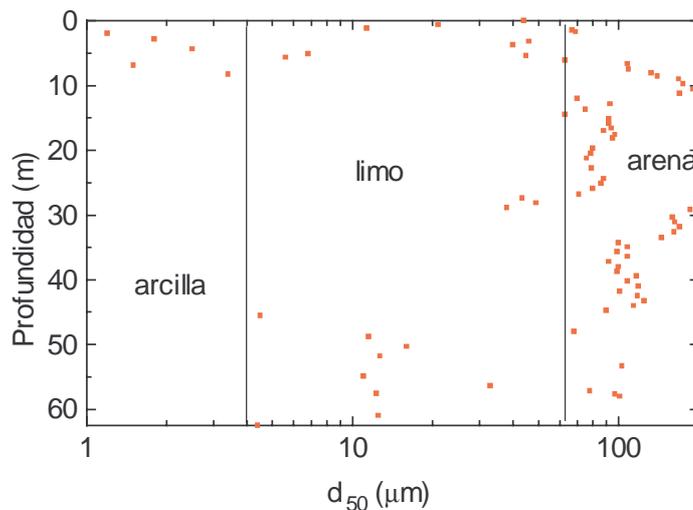


Figura 12. – Diámetro medio del sedimento en función de la profundidad.

Del análisis global de la información registrada en todo el lago Mead, Lara y Sanders (1970) concluyen que los depósitos están formados, en su conjunto, por un 60% de arcilla, un 28% de limo y un 12% de arena. Estos valores incluyen el aporte del río Virgin. Teniendo en cuenta solamente la región modelada, un análisis propio arrojó una composición global con 30% de arcilla, 48% de limo y 22% de arena. Si este análisis se aplica a todo el lago, resulta una composición de 53% de arcilla, 33% de limo y 14% de arena, compatible con los cálculos de Lara y Sanders.

Respecto de las curvas granulométricas del material suspendido, en el informe de Lara y Sanders (1970) no se dan detalles. Los únicos datos que se han podido obtener corresponden a dos aforos aislados, en 1945, reportados por Howard (1953) y reproducidos en la Figura 13. Se observan grandes diferencias, siendo que la curva del 16 de agosto indica que el 50% del

material suspendido está constituido por arcilla, con un 5% de arena, mientras que para el 30 de mayo la situación es inversa, con un 75% de arena y sin arcilla.

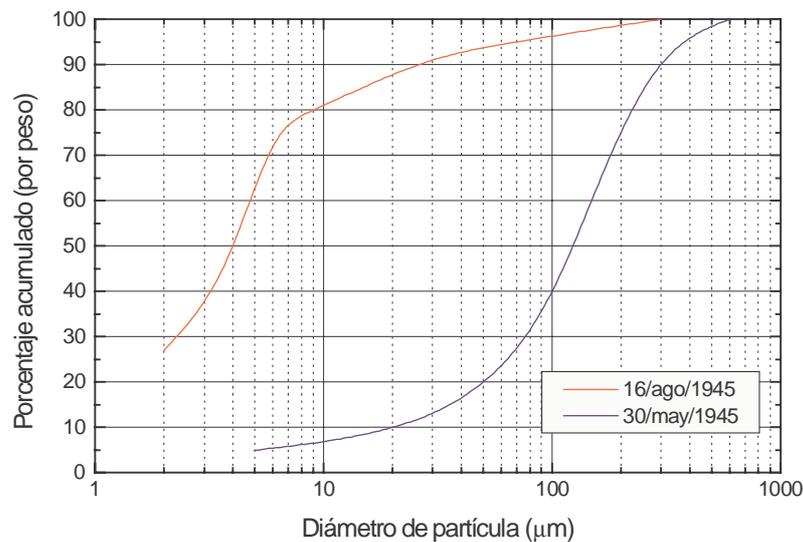


Figura 13. – Curvas granulométricas obtenidas en la estación de muestreo cercana al Gran Cañón.

## IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HEC-6

Probablemente, el modelo de dominio público más conocido y utilizado para estudiar el presente problema es el *HEC-6*. El mismo, desarrollado con el objeto de estudiar erosión y sedimentación en ríos y reservorios, es unidimensional pero permite analizar redes de canales. El registro de flujo entrante es dividido en una secuencia de flujos estacionarios de amplitud y duración variables.

Se debe proveer la carga de sedimento en la sección aguas arriba, para cada fracción granulométrica, como una función del caudal de entrada. Para arena, la carga de sedimento en el resto de las secciones se computa a partir de la elección de alguna fórmula de transporte (doce preestablecidas propuestas por diversos autores, pudiéndose trabajar también con ecuaciones especificadas por el usuario), con correcciones por la disponibilidad de material en el lecho, la carga de lavado y el acorazamiento.

El modelo se ha implementado en el brazo del lago Mead en correspondencia con el río Colorado en un tramo del orden de los 150 km, que abarca desde aguas arriba de la boca del embalse hasta el encuentro de los dos brazos principales, tal como se muestra en la Figura 14.

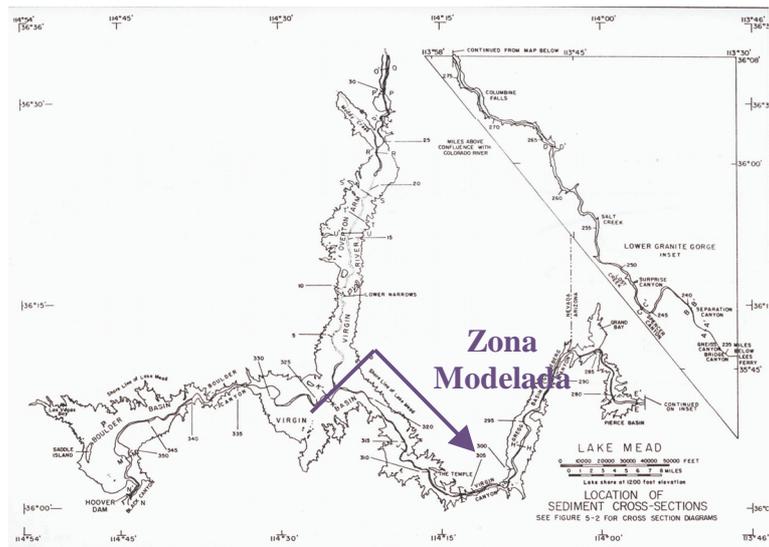


Figura 14.- Configuración en planta del Lago Mead.

El vaso del lago Mead presenta en la mayor parte de su recorrido laderas de pendientes moderadas, identificándose fácilmente una dirección principal de escurrimiento, lo que permite aplicar un modelo unidimensional para estimar los procesos de sedimentación.

Tras analizar las distintas metodologías de evaluación del transporte disponibles en el *HEC-6*, se adoptó la fórmula de Meyer-Peter y Muller con la que se registraron los mejores resultados.

Los primeros años, coincidentes con el llenado de la presa, los depósitos se registran en zonas intermedias del vaso, con una distribución más o menos extendida, aunque siempre con valores más altos en el tramo de aguas arriba. A continuación se desarrolla el delta en la cabecera del embalse, que crece progresivamente hacia aguas abajo (Figura 15).

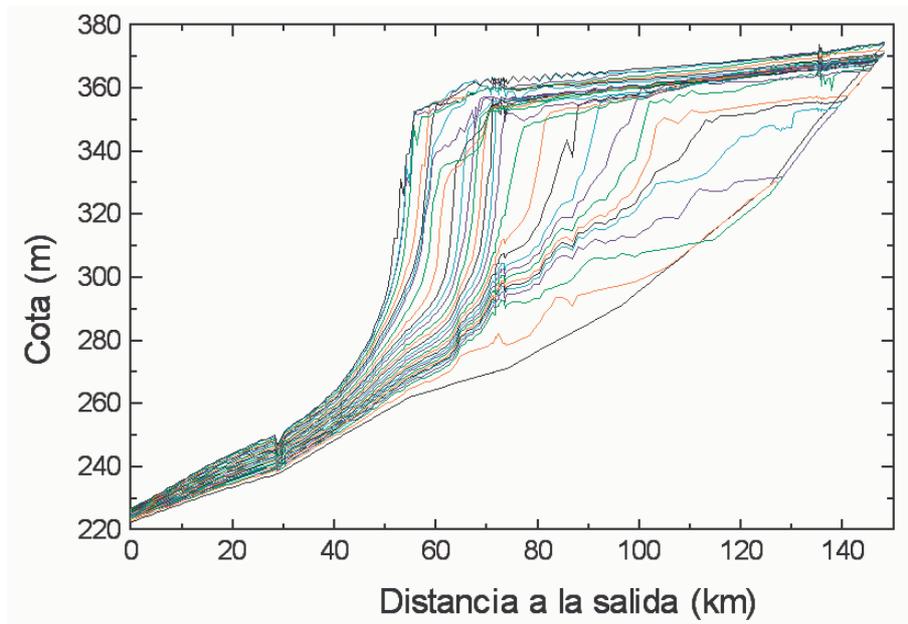


Figura 15. - Perfiles anuales del lecho del lago Mead (modelo).

En las Figuras 16 y 17 se presentan las comparaciones entre los perfiles relevados y calculados con el modelo a 15 y 30 años del cierre de la presa.

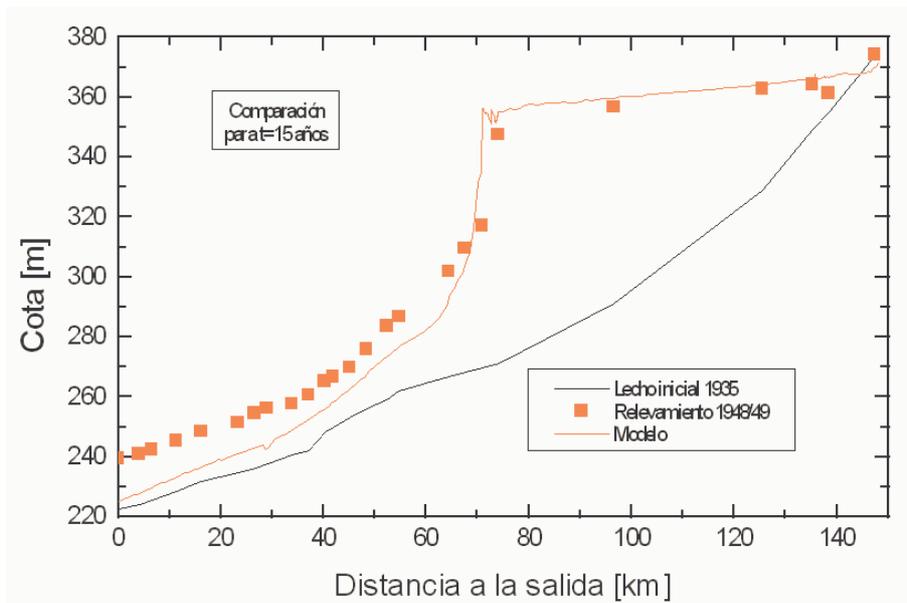


Figura 16.- Comparación entre perfiles relevados y calculados a los 15 años.

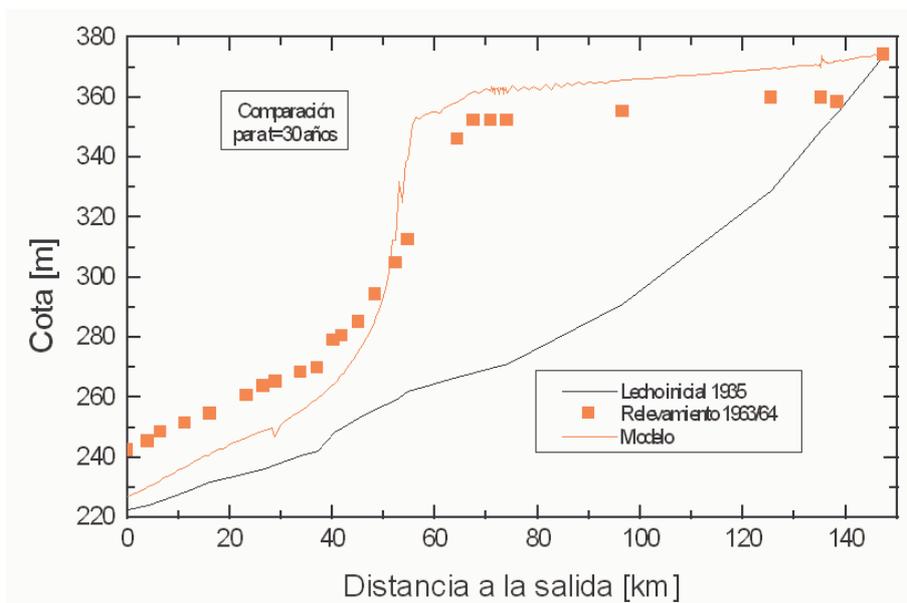


Figura 17.- Comparación entre perfiles relevados y calculados a los 30 años.

Los resultados a 30 años y en especial a 15 años son consistentes con los resultados de los relevamientos. Algunas diferencias se presentan a 30 años, donde se aprecia una estimación en exceso del avance del frente del delta y un defecto en los depósitos de aguas abajo. Considerando por una parte que los volúmenes se compensarían y por otra la mayor pendiente del perfil de los depósitos en el frente de avance, estas diferencias pueden deberse a que el modelo no tiene en cuenta los ángulos de reposo del material sumergido, ni las corrientes de densidad.

En la Figura 18, se indica la división de los depósitos en zonas compuestas por material fino y grueso, tomando como límite un  $d_{50}$  de 16mm. En ella también se ha volcado la interfase determinada por Gould a partir de los relevamientos de 1948/49 (Howard 1953). Puede apreciarse una gran concordancia, sobre todo teniendo en cuenta el carácter difuso de este tipo de límites.

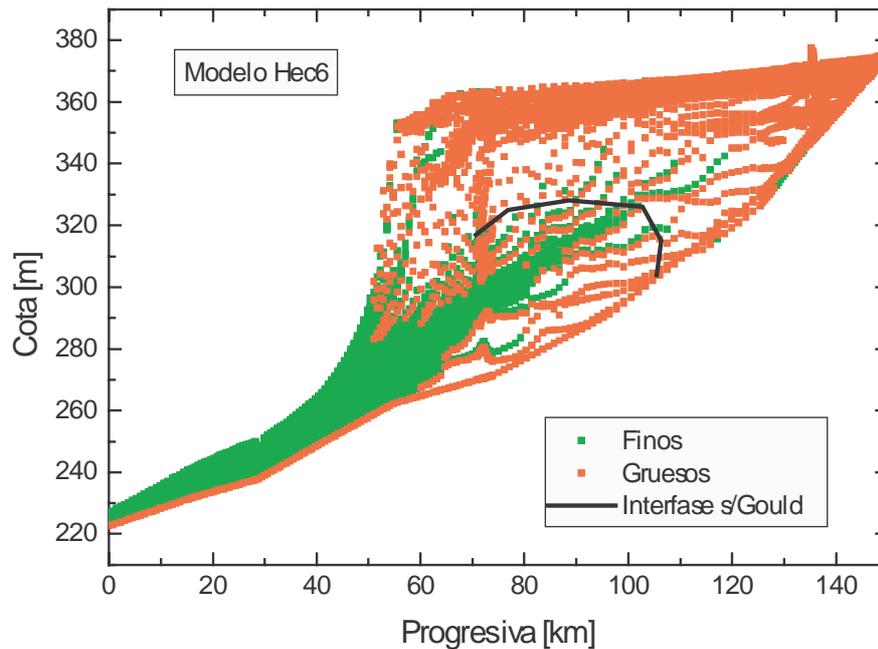


Figura 18.- División de los depósitos en zonas compuestas por material fino ( $d < 16\text{mm}$ ) y grueso ( $d > 16\text{mm}$ ).

## CONCLUSIONES

- Tanto en la configuración de los perfiles topográficos como de la composición y estratificación de los depósitos se tuvo una buena capacidad de predicción con el modelo implementado.
- El modelo subestima la posición del depósito más allá del pie del delta, efecto que puede atribuirse a que no se contempló el transporte de sedimento a través de corrientes de turbidez, las cuales serían las responsables de tal formación.
- En la predicción de la sedimentación de embalses, los errores observados en la aplicación presentada no son significativos, pudiéndose hacer no sólo un análisis cualitativo, sino también cuantitativo de los fenómenos.
- La utilización de modelos de mayor complejidad respecto del HEC-6, además de dificultar las tareas asociadas a su implementación, incrementarán los tiempos de ejecución y procesamiento de las simulaciones, no implicando su uso una mejora en las predicciones, ya que pueden ser necesarios datos de difícil disponibilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gee, D.M. (1993). "HEC-6: Reservoir sediment control applications". *Notes on sediment management in reservoirs: National and International perspectives*, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch.

HEC-6 (1993). "Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs". *U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center*.

**Howard, C.S.** (1953). "Density currents in Lake Mead". *Proceedings Minnesota International Hydraulic Convention*, pp. 355-368.

**Krone, R.B.** (1962). "Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling proceses". *Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley*.

**Lara, J.M. and Sanders, J.I.** (1970). "The 1963-64 Lake Mead Study". *U.S. Bureau of Reclamation, report REC-OCE-70-21, Denver and Boulder city*.

**Tarela, P.A., Spalletti, P.D.** (2000). "Comparación de modelos matemáticos para sedimentación de embalses". *Informe LHA-S5-091-00. Proyecto Interno PRO 1.111.*

**Thomas, W.A. and Prasuhn, A.L.** (1977). "Mathematical modeling of scour and deposition". *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 103 No. HY8 pp. 851-863*.