



Gestión de la sedimentación en embalses nuevos y existentes

Management of siltation in existing and new reservoirs

Revista de Obras Públicas
nº 3.509. Año 157
Abril 2010
ISSN: 0034-8619

Dolores Cordero Page. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director de Programa en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

dolores.cordero@cedex.es

Alejandro Albert Rodríguez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Subdirector de Proyectos, Obras y Explotación de Hidroguadiana, S.A. alejandro.albert@hidroguadiana-sa.es

Resumen: La gestión de la sedimentación en los embalses es un aspecto que, cada vez más, adquiere una mayor relevancia debido a las consecuencias que se derivan para la explotación y mantenimiento de las presas. Desde el punto de vista ambiental supone un reto conjugar el trasiego de los sedimentos con la posibilidad del alto riesgo de afecciones que pueden producir debido a una gestión ineficaz.

Palabras Clave: Sedimentos; Dragado; Gestión sostenible; Aterramientos

Abstract: Reservoir sedimentation management is a relevant concern that increasingly takes on greater significance because of the consequences that adversely affect the operation and maintenance of dams. From the environmental point of view it raises a challenging question. How to combine the movement of sediments with the high-risk conditions that can occur due to an inefficient management.

Keywords: Sediments; Dredging; Sustainable management; Siltation

1. Introducción

El tema de la Q.89, referente a la gestión de la sedimentación en los embalses, trata un aspecto de gran importancia debido a las consecuencias que tiene en la explotación y mantenimiento de las presas existentes y en las de nueva construcción.

En este artículo se describe el desarrollo de esta Cuestión en el Congreso Internacional de Grandes Presas de 2009 con las consideraciones del Ponente General, presentando un resumen de las principales conclusiones así como de las comunicaciones que por parte de España se presentaron relativas a este tema.

2. Ponencias presentadas

En el Congreso de ICOLD de 2009, se presentaron un total de veintiocho ponencias correspondientes a la gestión de la sedimentación en los embalses nuevos y existentes. En la tabla 1 se muestra la procedencia de los diversos autores que redactaron las ponencias e

informes relativos a estos temas. Dos de estas ponencias han sido presentadas por autores españoles.

Tabla 1.

País	Nº de ponencias
China	1
Colombia	2
Egipto	1
España	2
Francia	2
Irán	1
Italia	1
Japón	8
Marruecos	2
Pakistán	1
República Checa	1
Rumanía	1
Rusia	1
Eslovaquia	1
Suiza	2
EEUU	1
TOTAL	28

Los altos índices de sedimentación que se pueden presentar en algunos embalses así como la mayor atención a la conservación de las presas a largo plazo han subrayado la importancia de la sedimentación de los embalses. Uno de los principales problemas de la sedimentación en los embalses es la merma de capacidad de almacenamiento. También son importantes los daños que se pueden presentar en las turbinas y pérdida de producción hidroeléctrica y los impactos aguas abajo de la presa.

Actualmente la capacidad de los embalses en el mundo es de aproximadamente 7.000 km³ (6.100 km³ están registrados por ICOLD, pero se incluyen las presas menores de 15 m, la actual capacidad de almacenamiento podría ser de 7.000 km³), de los cuales 3.000 km³ son inútiles para el uso hidroeléctrico. De los 4.000 km³ restantes, la mayoría se dedican a la energía hidroeléctrica y cerca de 1.000 km³ para riego, almacenamiento de agua potable o industrial y otros usos.

La carga anual de sedimentos de todos los ríos del mundo en conjunto se estima entre 24.000 y 30.000 millones de toneladas, para una afluencia de agua de 40.000 km³, es decir, una concentración media de sedimentos de 0,60 a 0,75 t/1.000 m³ de agua pero que varía enormemente según el río y su caudal. No todos los ríos se represan, ni todos los sedimentos son retenidos en los embalses: los sedimentos acumulados en los embalses del mundo se estiman en 1.400 millones de m³. La media de edad de las presas está entre 30 y 40 años, es decir unos 40.000 millones de m³ anuales, lo que supone un 0,6% de la capacidad total anual de almacenamiento.

La mayor parte de la sedimentación se encuentra en las presas de aprovechamiento hidroeléctrico, en parte como pérdida de capacidad. Pero la pérdida de suministro eléctrico no es sin embargo, proporcional a la pérdida de capacidad útil de almacenamiento. La pérdida anual de suministro energético supone alrededor del 0,5% de una inversión total en capacidad útil de alrededor de 1 billón de dólares, es decir, 5 mil millones de dólares anuales. Como los embalses hidroeléctricos se colmatan, tienen que ser sustituidos finalmente por nuevas presas, lo que supone un coste total de la capacidad de almacenamiento (neta y bruta) y una inversión inicial para su construcción de 1,7 billones de dólares, con lo que el coste anual de la sustitución es de 0,6% x 1.700.000 = 10.000 millones dólares / año.

La pérdida anual de almacenamiento de los embalses destinados al riego, 7.000 millones de m³ aproximadamente, tiene un impacto directo sobre la capacidad de riego: para una inversión de 0,2 a 0,5 dólares/m³ para las reservas de más de 10 millones de m³, o hasta 1 dólar/m³ para las presas de menos de 50.000 m³, que a menudo encontramos en el subcontinente Indio y en África. Si estimamos un coste de inversión global de 0,5 dólares/m³, la pérdida anual puede estar entorno a los 3.500 millones de dólares. También hay que considerar el coste de los daños aguas abajo de la presa y, para aproximadamente el 5 o 10% de las centrales hidroeléctricas, las pérdidas de suministro de energía y el coste de mantenimiento por el desgaste de las turbinas.

La pérdida total anual relacionada con los problemas de sedimentación es pues, de alrededor de 15.000 millones de dólares (excluyendo impactos aguas abajo de la presa) y considerando los impactos aguas abajo, el coste anual asciende a unos 17.000 millones de dólares (Palmieri en 2000 declaró 13.000 millones de dólares/año), lo que merece ser tenido en cuenta. Sin embargo esto debería ser comparado con los costes y beneficios anuales totales de las presas, es decir, unos 40.000 millones de dólares (WCD declaró de 32.000 a 46.000 millones de dólares durante el decenio de 1990) en inversiones y 17.000 millones de dólares para la explotación, mantenimiento y mejora (0,7% x 2,4 billones de dólares, porcentaje entre 0,3 a 0,7%), es decir, un coste total en torno a 57.000 millones de dólares. Por otro lado unos 125.000 millones de dólares de suministro de energía eléctrica (2500 twh x 0,05 dólares) y de 50 a 100 mil millones en otros beneficios (especialmente riego de cultivos que abastecen a 500 millones de personas).

Los 17.000 millones de dólares del coste del impacto total anual de la sedimentación de embalses se deben comparar, por lo tanto, con el conjunto de costes anuales (57.000 millones de dólares) y con el conjunto de los beneficios anuales (175.000 a 225.000 millones de dólares) de todas las presas del mundo. El coste anual de la sedimentación en los embalses (en términos de coste de reposición) es, pues, alrededor del 30% de los gastos generales, lo que no es insignificante. Sin embargo, mucho menos del 30% se dedica a medidas y soluciones de mitigación de la sedimentación, dejando pendiente en muchos países la solución del problema a las futuras generaciones.



Tabla 2. Gestión de la sedimentación de embalses mediante el traspaso de los sedimentos a través del propio embalse.

N°	Título	País	Autor
1	El vertido de sedimentos y medidas de mitigación ambiental en el río Kurobe	Japón	Tetsuya Sumi y otros
2	Corrientes de turbidez en el origen de la sedimentación en los embalses. Casos de estudio	Suiza	Jolanda M.I. Jenzer Althaus y otros
3	Medidas de control de sedimentos y mejora los efectos de las condiciones física y ambiental por el vertido: Estudio en la presa Yahagi	Japón	Kusumi Seto y otros
4	Análisis numérico del efecto de la ubicación de la compuerta en la eficiencia de eliminación de sedimentos del embalse	Irán	Mostafa Hajj Hoseini y otros
5	La sedimentación en los embalses y su control	China	Qingchao Guo & Wenhong Cao
6	Gestión de los sedimentos en el embalse de Tablachaca, Perú	Colombia	Juan J Marino y otros
7	Problemas de sedimentación en los embalses de la Kraftwerke Sarganserland. Aireación de las corrientes de turbidez como medida esencial de la solución	Suiza	Phillipe J Muller y otros

3. Temas Principales

Las ponencias presentadas en el Congreso de Brasilia abarcan un amplio espectro de la gestión de la sedimentación. Las presentaciones pueden agruparse en estos cuatro temas principales:

- Tema 1: Gestión de la sedimentación de embalses mediante el traspaso de los sedimentos a través del propio embalse
- Tema 2: Gestión de la sedimentación de embalses mediante dragado, hidrosucción o trasvase

- Tema 3: Captura de sedimentos aguas arriba de la presa
- Tema 4: Consideraciones generales sobre la gestión sostenible de sedimentos

Las tablas 2 a 5 muestran los títulos de las ponencias que fueron clasificadas en los cuatro temas principales antes mencionados. En algunos documentos, se abordó más de un tema. En esos casos, cuando una ponencia se refiere a dos o más temas, fue clasificado bajo el tema que se consideró más destacado en el debate.

Tabla 3. La gestión de la sedimentación en los embalses mediante el dragado, hidrosucción o trasvase.

N°	Título	País	Autor
1	Tratamiento primario del sistema de dragado para la reubicación de los sedimentos de la presa en el río	Japón	Tetsuya Sumi y otros
2	Eliminación de los fangos del embalse Mechra Homadi (Marruecos), y la puesta en servicio de los desagües de fondo	Marruecos	Bachir Akalay y otros
3	Efecto del sistema de trasvase de sedimentos como una medida a largo plazo contra la turbidez y la sedimentación en el embalse	Japón	Akira Mitsuzumi y otros
4	Evaluación del grado sedimentación y de las medidas de prevención y control de los fenómenos de sedimentación de embalses en Rumania	Rumania	Nicolae Dascalescu y otros
5	Soluciones para la sedimentación en los embalses en el sur de España	España	Silvia García Wolfrum y otros
6	Estudio de la aplicación de la gestión de los recursos para la gestión de la sedimentación en el embalse	Japón	Tetsuya Sumi y otros
7	Estudio de sedimentación en el futuro embalse de Terrateig (Valencia, España)	España	Gabriela Mañueco y otros



Tabla 4. Captura de sedimentos aguas arriba de la presa.

Nº	Título	País	Autor
1	Plan de gestión sostenible de los sedimentos del embalse multifuncional Wonogiri en Indonesia	Japón/ Indonesia	Minoru Ouchi y otros
2	Gestión de los sedimentos en el proyecto hidroeléctrico de Chivor, Colombia	Colombia	Juan J. Marino y otros
3	Sedimentación de los embalses en la cuenca del río Sulak	Rusia	N.A Aliev y otros
4	Desarrollo del programa de gestión de los sedimentos basado en un modelo numérico unidimensional para el embalse de Diamer Basha	Pakistán	Foad Hussain
5	Régimen de control de sedimentos de los ríos y embalses en el noroeste de Bohemia	República checa	Martin Motlik
6	La presa Alesani: mejora de la toma de agua amenazada por los sedimentos	Francia	Joseph Paoli y otros
7	La sedimentación de los embalses en Marruecos	Marruecos	My. Driss Hasnaoui y otros

Tabla 5. Consideraciones generales sobre la gestión sostenible de sedimentos.

Nº	Título	País	Autor
1	Sostenibilidad de embalses: identificación, evaluación y correcta aplicación de las estrategias de gestión de la sedimentación en los embalses	USA	George W. Annandale & Alessandro Palmieri
2	El problema de sedimentación en embalses de grandes presas italianas.	Italia	Fabio Bizzini y otros
3	Gestión de los sedimentos: cuenca del Durance	Francia	J.P. Bouchard y otros
4	Sedimentación en embalse de la Presa de Asuán en Egipto	Egipto	Abd El Raman M. Shalaby
5	La sedimentación en los embalses de Eslovaquia. Sus causas, consecuencias y métodos para hacer frente a esta cuestión	Eslovaquia	Miroslav Lukak y otros
6	Evaluación del impacto en las presas de laminación de avenidas sobre la gestión de la sedimentación	Japón	Toshiyuki Aoyama y otros
7	Caracterización de sustancias húmicas depositados en el fondo de los embalses y su eficiente utilización	Japón	Takashi Toyoda y otros

Tema 1: Gestión de la sedimentación de embalses mediante el traspaso de los sedimentos a través del propio embalse

Las ponencias cubren diversos temas en relación a la gestión de la sedimentación que se tienen en consideración cuando el sedimento pasa a través del embalse. Los temas específicos tratados bajo este punto incluyen:

- Mejora de la eficiencia en la descarga y vertido (diseño efectivo de compuertas y funcionamiento, optimización del flujo y control de la veloci-

dad previa a la descarga, ubicación de los desagües)

- Ventilación de corrientes de turbidez: modelización y aspectos operacionales
- Aspectos medioambientales

Sumi y otros presentaron sus resultados sobre los efectos de la descarga de los sedimentos y medidas de mitigación medioambientales en dos grandes presas: Unazuki y Dashidaira, en el río Kurobe (Japón). Las operaciones de descarga y vertido de las dos presas se llevaron a cabo de manera coordinada. En su ponencia, Sumi, Nakamuar y Hayashi mostraron de forma detalla-





Fig. 1. Presa de Unazuki y Presa de Dashidaira.

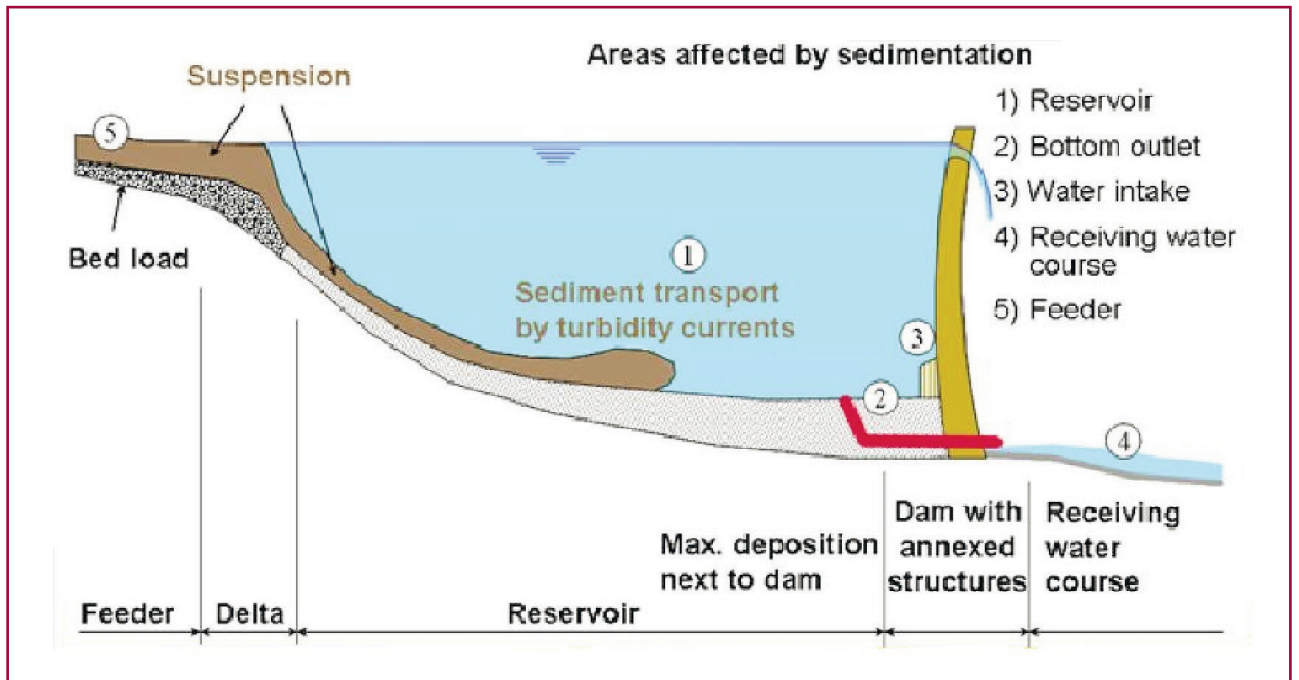
da los resultados de las operaciones y la eficiencia en la descarga de los sedimentos, de los cambios físicos medioambientales en el cauce del río aguas abajo (incluyendo su crecida) y del efecto que el vertido tiene en peces y otras especies. Se concluyó que se mejora significativamente la eficiencia de la descarga mientras se trabaja a bajos niveles de agua. El informe recalca la importancia de la determinación exacta del volumen de descarga favorable, el tiempo y el período en los que el vertido tiene que ser conducido para minimizar los efectos medioambientales así como para mejorar la eficiencia de la descarga. Se han utilizado los canales de evacuación dando buenos resultados para peces y otras especies cuando los niveles de turbidez son altos debidos al vertido.

La presentación japonesa de Seto y otros se centra en el tema de la eliminación del sedimento a través del vertido en referencia a la necesidad de mitigar los efectos del descarga en las condiciones físicas y medioambientales en los tramos bajos del río. Se basa concretamente en el caso estudiado en la presa Yahagi en Japón. En la presentación, los efectos de la sedimentación por descarga de las condiciones ambientales en los tramos bajos del río se estudian mediante un modelo. La forma viable de medir el vertido de los sedimentos en la presa Yahagi fue por medio de hidrosucción. El sedimento fue succionado y vertido a través de un túnel hacia tramos aguas abajo de la presa. Esta medida es adecuada en este caso concreto por la necesidad de maximizar el almacenamiento de agua en el embalse ya que el trasvase de la crecida reduciría el volumen del agua en el embalse. Además, el agua puede arrastrar el sedimento a través del túnel de descarga en el momento preciso en que haya suficiente agua almacenada en la presa Yahagi. El sistema

de succión se está construyendo actualmente. El seguimiento de los efectos a largo plazo de la descarga de sedimentos en el medio fluvial, considerando la distribución del tamaño del árido, sección transversal, materiales del lecho, calidad del agua y organismos, no fue satisfactorio debido al escaso volumen de sedimentos que fueron devueltos al río.

Jenzer-Althaus y otros tratan el concepto de las corrientes de turbidez en el comienzo de la sedimentación en el embalse basándose en varios casos estudiados de embalses alpinos en Suiza. Las corrientes de turbidez son corrientes de agua con grandes concentraciones de sedimentos muy pequeños. Los materiales transportados son normalmente el resultado de la erosión del sustrato en la zona de captación. Para controlar la sedimentación provocada por las corrientes de turbidez en un embalse, se construyó un obstáculo a modo de muro de contención que bloqueaba el flujo de la corriente turbia al aproximarse, por lo que el sedimento quedaba retenido detrás de dicho muro y apartado de la presa. Los análisis de dicha medida mostraron que la retención del sedimento mediante dicho obstáculo podía prolongar la vida de la presa de 20 a 50 años. En otro embalse, utilizando un modelo numérico, se propuso que se obstaculizaran dos secciones. El primer obstáculo fue situado en una sección a 3 km aproximadamente de la entrada del embalse, mientras que el segundo (una pantalla de geotextil) se colocó a 2,5 km aguas arriba de la presa. Se utilizó un modelo 3D para determinar la posición y la altura de ambos obstáculos. Mientras que en el caso de estudio de los otros dos embalses, se recomendó la aireación de las corrientes de turbidez. Empleando el mismo modelo numérico, fue posible determinar el período óptimo de apertura de la

Fig. 2. Zonas del embalse afectadas por la sedimentación.



salida aguas abajo de la presa para evacuar las corrientes de turbidez.

Hajihoseini y otros comentan cómo la posición de la compuerta puede afectar significativamente la eficiencia en la extracción de los sedimentos durante la descarga hidráulica. Utilizando un modelo en 3D para simular numéricamente el flujo del sedimento, consiguieron determinar la localización óptima de la compuerta.

De los resultados, se puede concluir que cuanto más cerca está la compuerta del centro de la presa, mayor es el volumen de sedimento que se puede evacuar. Se supone que el vaso del embalse está situado simétricamente en relación al centro de la presa.

Guo y Cao analizan la situación actual de la sedimentación en embalses de China y las medidas correspondientes para tratarla. Se dan medidas ge-

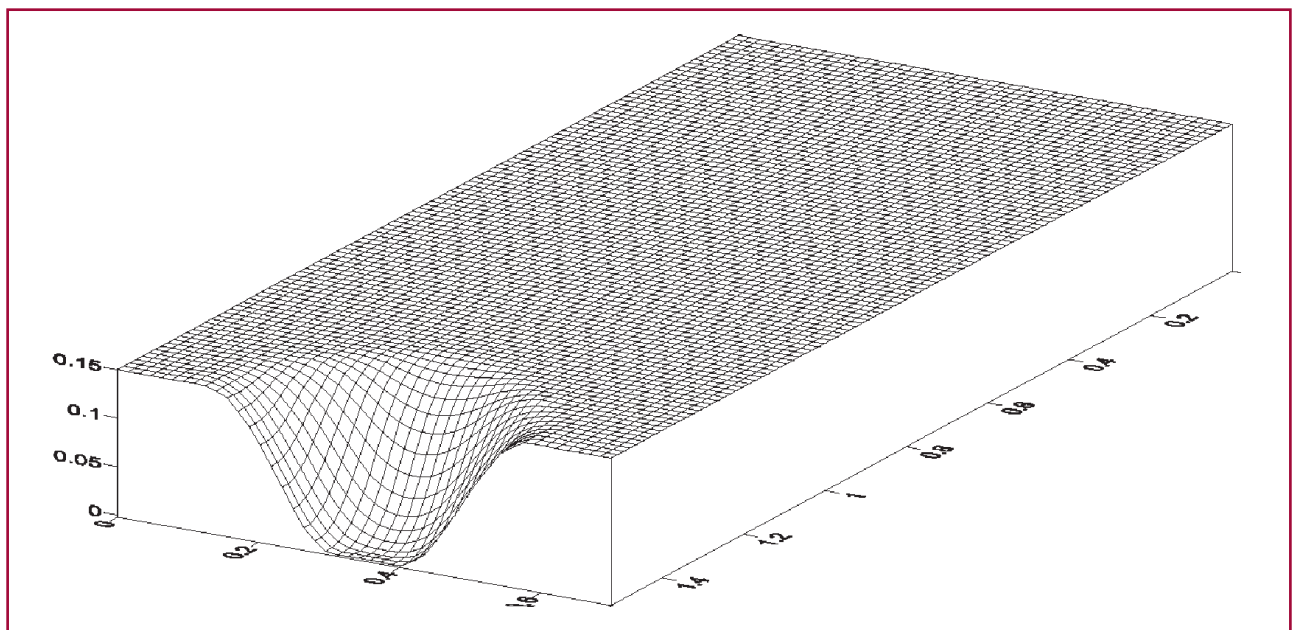


Fig. 3. Cono de sedimentos en una compuerta situada en el centro de la presa.



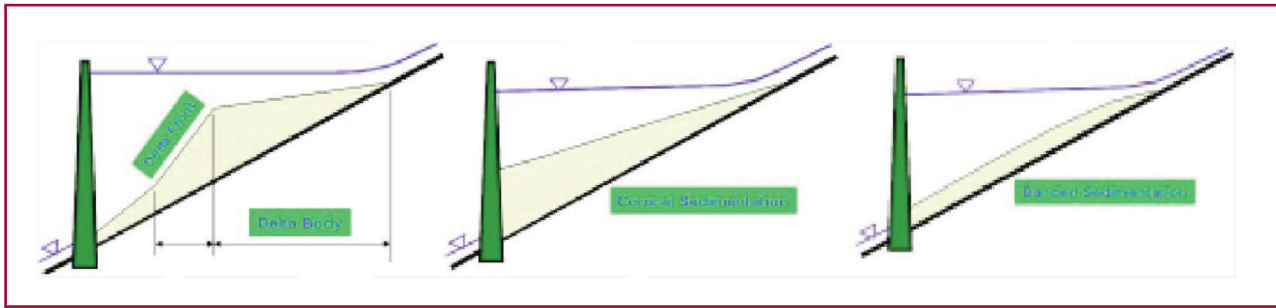


Fig. 4. Tres perfiles tipo de sedimentación en un embalse.

nerales aplicables en China. Dos casos de estudio en presas proporcionan una detallada explicación de cómo se trata la sedimentación en embalses. En uno de los embalses, se tuvo que recurrir a la renovación para poder almacenar el agua limpia mientras se eliminaba el agua cargada de sedimentos. Se intentó que la reconstrucción aumentara la capacidad de evacuación de la presa de manera que se vertiera la mayor cantidad posible de agua cargada de sedimentos. En el otro caso, Guo y Cao profundizaron en los efectos que los proyectos hidroeléctricos en cascada producen en la sedimentación, en particular cómo el funcionamiento de los embalses situados aguas arriba afectan a los de aguas abajo. Utilizando el caso de una presa con otra presa situada aguas arriba de la misma, se realizó un cálculo de los procesos de sedimentación mediante simulación numérica por medio de un modelo matemático de 1D. De dicho análisis, se pudo concluir que la presencia de presas aguas arriba reduce enormemente la sedimentación en los embalses situados aguas abajo y a largo plazo prolonga la vida útil de estos embalses.

Marino y otros de Colombia, presentan sus descubrimientos en el estudio sobre la gestión de los sedimentos en el embalse Tablachaca en Perú. El objetivo del proyecto era desarrollar un plan de gestión de sedimentos del embalse factible durante el período de operaciones de vertido. Se construyó un modelo físico de lechos móviles del embalse Tablachaca. Para asegurar una segura operación de vertido, se llevaron a cabo las siguientes recomendaciones: cambio de las cotas del contorno del embalse de manera que las corrientes que afectan la base de la zona inestable puedan ser desviadas, protección de las paredes entre contrafuertes con varios materiales de relleno y protección de los contrafuertes con riprap y con grandes rocas. Se consideró la solución con riprap como la más idónea. Más adelante, utilizando el modelo, se

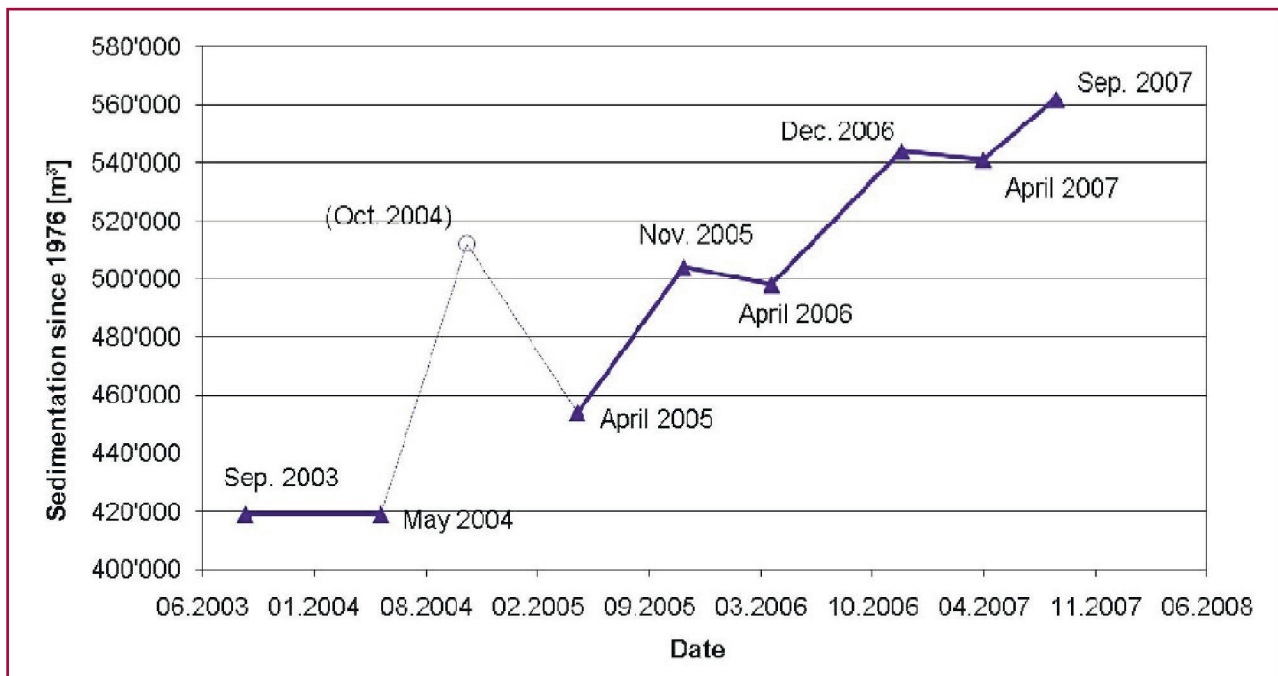
constató que el sedimento de la descarga dependía fundamentalmente del vertido del río. En este caso particular, se consideró como adecuado un vertido mínimo de 400 m³/s para una eficiente renovación de sedimento en ese embalse en concreto.

De Suiza, Nuller y De Cesare comentaron el método de aireación de corrientes turbias como tema esencial para la solución de problemas de sedimentación en embalses con alusión a Kraftwerke Sarganserland (esquema hidroeléctrico). Utilizaron un método de excavación de sedimentos con una técnica de impulsión de aire constatando que es muy complicado conseguir los resultados requeridos. El problema sedimentario fue principalmente debido a las corrientes turbias. Se aconsejó la toma de las siguientes medidas: en primer lugar, no introducir en el embalse agua cargada de sedimento para minimizar la entrada del mismo, hacer circular las corrientes de turbiedad mediante la apertura del desagüe de fondo, y por último, continuar generando electricidad mediante el agua cargada de sedimento.

Fig. 5. Vista del modelo físico de la presa de Tablachaca, Perú.



Fig. 6. Volumen de sedimentos en el embalse de Mapragg desde 2003 (los datos de octubre de 2004 son visiblemente erróneos y los volúmenes han sido corregidos teniendo en cuenta la extracción de sedimentos).



Tema 2: Gestión de la sedimentación de embalses mediante dragado, hidrosucción o trasvase

Las ponencias en este apartado describen cómo se ha gestionado el sedimento mediante operaciones específicas de dragado, hidrosucción o trasvase. Los temas específicos que han sido abordados incluyen:

- Aplicación de métodos de excavación de sedimentos húmedos y secos
- Eliminación del sedimento excavado, calidad del sedimento y tratamiento

Fig. 7. Clasificador en espiral.



- Costes de dragado y análisis económico
- Temas medioambientales

Sumi y otros explican el concepto de tratamiento primario que constituiría parte del sistema de dragado previo a la reposición del sedimento en el río. Del mismo modo, proporcionan soluciones para un dragado seguro e indican cómo conseguir material con un tamaño de grano adecuado procedente de sedimento que contiene nutrientes sedimentados muy finos. En el informe, se describe la colocación del sistema incluyendo sus componentes más importantes. Los resultados de la prueba de campo realizada en la presa Nunome de Japón proporcionan las propiedades y el volumen del sedimento dragado y la velocidad del sistema de tratamiento. De los resultados se concluye que el sistema de tratamiento de sedimento en el embalse funcionó correctamente. Con una velocidad de tratamiento del sedimento dragado de 3 a 4 m³ por hora, el sistema fue capaz de producir arenas finas y gruesas del 70 a 80% del sedimento dragado reduciendo así el contenido de finos previo a la reposición de nuevo del sedimento aguas abajo. El sistema de tratamiento también puede reducir el contenido de DQO, nitrógeno y fósforo. Por lo tanto, se concluyó que, una vez adoptado, el nuevo sistema de tratamiento de sedimento propuesto ayudaría en la reducción de la eutrofización y problemas de turbidez en los embalses.



Akalay, Kettani y Ferhan describen el proceso de eliminación de lodos del embalse Mechra en Marruecos. El trabajo proporciona un esquema detallado de cómo se ha eliminado el sedimento del embalse mediante eliminación de lodos y cómo se utiliza ocasionalmente para restablecer la puesta en servicio del desagüe de fondo. El procedimiento utiliza un dragado hidráulico con una bomba de succión de agua. Sólo se eliminan los depósitos sólidos. El agua presente en el proceso se devuelve al embalse. El lugar para la eliminación del lodo fue un área de 190 ha, situada a 2 km de la presa, en una depresión natural y rodeada por una colina en uno de sus lados. Se transportó el sedimento a dicha área mediante tuberías que conectaban la bomba de succión y el lugar de eliminación del lodo. En el área de vertido, para controlar la dispersión del sedimento, se reforzaron las zonas de menor altura mediante troncos y hormigón con alturas entre 10 y 30 m. Se adoptó un sistema de drenaje adecuado para el transporte del agua que provenía del lodo. Fue un proyecto que resultó satisfactorio de cara a la dirección de obra, los temas medioambientales y la calidad del agua.



Fig. 8. Embalse de almacenaje de lodos de la presa de Mechra en Marruecos.

En su informe, Mitsuzumi, Kato y Omoto han documentado los resultados con las actividades de supervisión y monitorización que se han llevado a cabo en el sistema de bypass de sedimento de la presa de Asahi en Japón. Las actividades de supervisión y monitorización comenzaron en 1988, continuando hasta 2006. El sistema de bypass de 2.350 m de longitud tiene una capacidad máxima de descarga de 140 m³/s. Puede hacer salir carga de fondo y/o agua turbia.

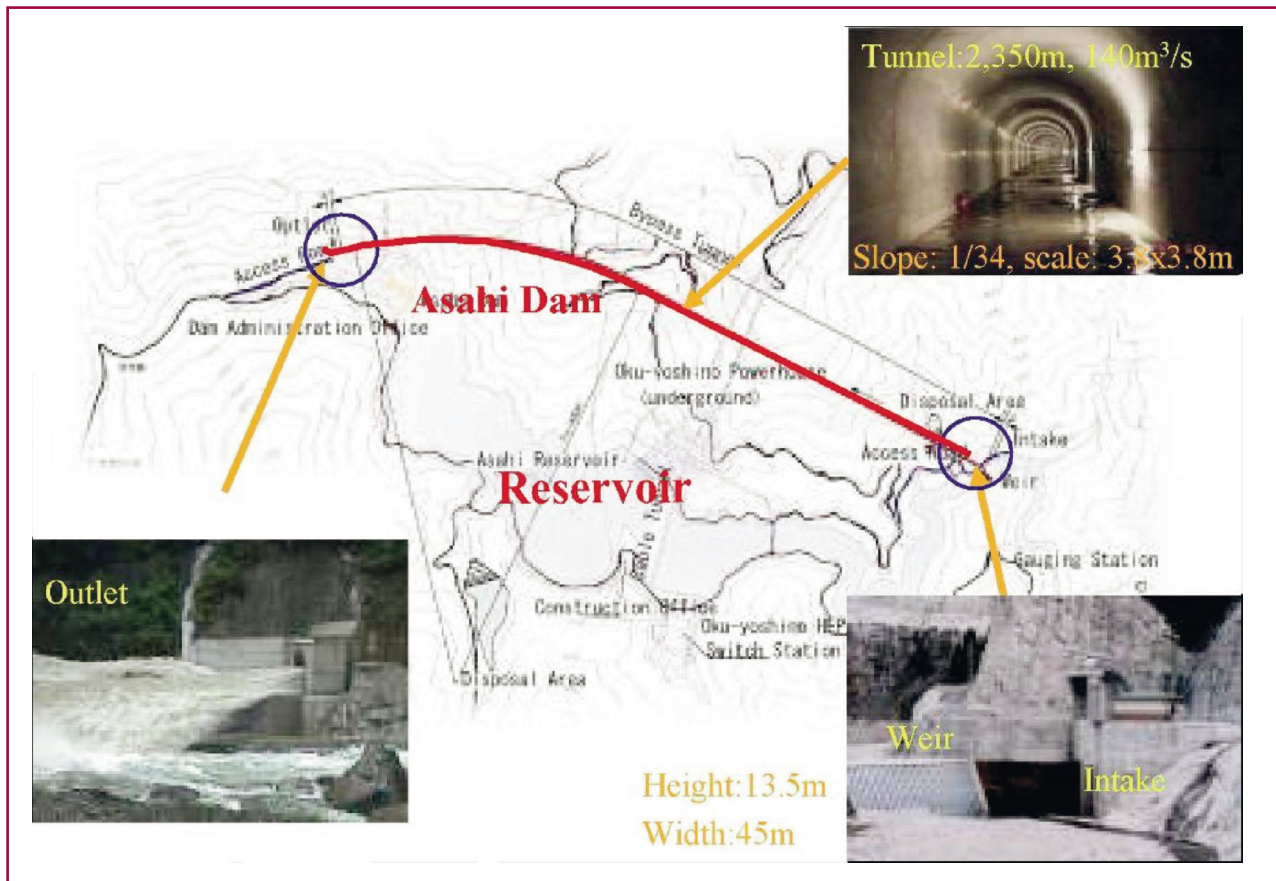


Fig. 9. Disposición de las instalaciones principales del sistema de derivación de la presa de Asahi en Japón.

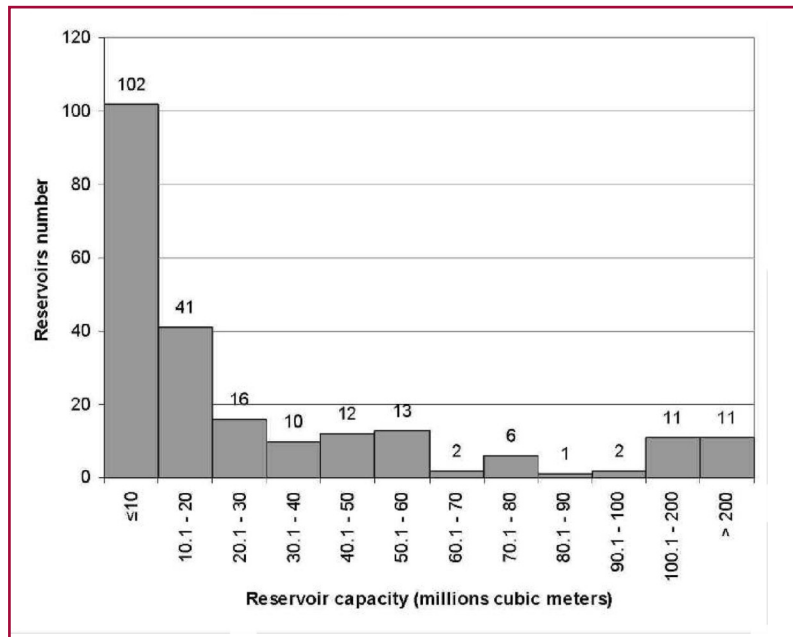


Fig. 10. Capacidad de los embalses en Rumanía.

Desde 1998 a 2006, se controló la turbidez tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa. El sistema de bypass logró que casi el 90% del sedimento se condujera aguas abajo sin que llegara a la presa y la calidad del agua en el embalse mejoró considerablemente. Aguas abajo de la presa, el bypass tenía un importante efecto en la flora y fauna. De hecho, según una medición de peces y algas, se observó que el aumento de sedimento transportado aguas abajo del río después de la operación del sistema de bypass favorecía el aumento de diversidad de la fauna. En conclusión, el sistema de bypass consiguió controlar la turbidez a largo plazo y la sedimentación en el embalse.

En Rumanía, Dascalescu, Asman y Dimu presentaron un informe sobre el estado de los principales embalses con alta concentración en limos. Los tres principales ríos en Rumanía tienen al menos cuatro embalses a lo largo de su curso con un total de más de veinte embalses con alta concentración de limos. Debido a la diversidad entre las características de los embalses, no se concluyó ninguna solución a la sedimentación. En uno de los embalses denominado Candesti, se inició un estudio para determinar la eficiencia en la ejecución del vertido hidráulico. Basadas en este estudio, se iniciaron nuevas normas de operación de vertido hidráulico que tenían en cuenta la determinación de la velocidad de descarga óptima. Estos resultados han permitido poner en marcha un programa de operación automático para el embalse. Se dragaron

algunos de los embalses en Rumanía y se utilizó normalmente alrededor del 6% de potencia producida. El dragado no consiguió devolver la capacidad de almacenamiento inicial del embalse sino la capacidad de almacenamiento útil de los embalses del estudio previo. Posteriormente, la eliminación del material dragado se realizó de manera que se apiló en ambas márgenes del río, afectando el cauce normal del río. Consecuentemente, el dragado no se utilizó como la principal medida de control de sedimento. Se decidió construir un conducto separado para el uso de la central hidroeléctrica a partir del canal.

Sumi y otros habla de un concepto tan conocido como la gestión de recursos pero centrándose específicamente en su aplicabilidad a la gestión de sedimentos en el embalse. Su trabajo presenta los resultados del estudio de las principales actividades, efectos y costes incurridos en las diversas medidas contra la sedimentación, a saber: dragado, excavación, control del sedimento de la presa mediante excavación, vertido, bypass del sedimento y excavación seca a embalse vacío. Sumi y otros ilustran sus descubrimientos mediante una serie de casos de estudio. Basándose en una cuidadosa optimización de los métodos de extracción, se concluye que la excavación en seco con el embalse vacío es la contramedida viable más económica, incluso si se considera la reducción de producción de energía y la producción de agua. Sumi y otros afirman que la excavación en seco con el embalse vacío es mucho más económico que el resto de métodos tales como descarga y bypass ya que necesitan un importante desembolso de capital inicial. De este modo, dicha conclusión requiere una evaluación de la optimización de los métodos de eliminación de sedimentos considerando las presas como un grupo. De esta forma, las presas dentro de un grupo (localización geográfica) pueden compensar las pérdidas por el uso del agua en el transcurso de la operación de excavación en seco en una de las presas dentro del grupo. A largo plazo, cada una de las presas del mismo grupo puede desempeñar un papel de presa de apoyo en el caso en el que una presa esté siendo vaciada.

Tema 3: Captura de sedimentos aguas arriba de la presa

El análisis de las ponencias presentadas indica que un cierto número de países gestiona los sedimentos



mediante su captura aguas arriba del embalse. Varias posibilidades en relación a este tema son:

- Uso de obstáculos y pantallas en los embalses y ríos que no abarcan toda la sección transversal
- Cascada proyectada aguas arriba
- Estructuras de retención
- Eficacia en las técnicas de gestión de cuencas hidrográficas (utilización sostenible del terreno, protección de ríos, etc)
- Prestación de servicios de almacenamiento fuera del cauce
- Gestión de la situación de los sedimentos del delta por el aumento de nivel mínimo de funcionamiento
- Previsión económica para atrapar los sedimentos en el embalse muerto

En la ponencia de Ouchi, Jin y Fukuda sobre el plan de gestión sostenible de los sedimentos del embalse multifuncional Wonogiri en Indonesia, se explica la aplicación de un depósito de almacenamiento de los sedimentos como una medida contra la sedimentación. Un modelo de análisis numérico 2D se desarrolló para predecir la sedimentación en el embalse Wonogiri. El modelo se utilizó para evaluar y predecir la eficacia de algunas de las medidas propuestas. De las medidas estructurales y no estructurales que se simularon utilizando el modelo que se propone, la medida más factible contra la sedimentación sería la construcción de un dique de cierre en el embalse. En esencia, este dique dividiría los sedimentos del embalse en un embalse de almacenamiento y el embalse principal Wonogiri. Esta modalidad permite reducir la sedimentación que afecta a la zona de la toma. Se propuso la conservación de las cuencas como una medida complementaria a la construcción de diques. Se preveía que la adopción de estas dos medidas haría que la sedimentación anual en el embalse fuera inferior a la tasa de sedimentación de diseño de 1,2 millones de m³/año.

Varias medidas en contra de la sedimentación de los embalses se realizan en Colombia. En la ponencia de Marino y otros se discuten las técnicas de gestión de los sedimentos para el proyecto hidroeléctrico de Chivor. El estudio fue motivado por el rápido desgaste de los equipos mecánicos que se estaba produciendo y que estaba vinculado con la presencia de sedimentos en el agua. Se realizó un

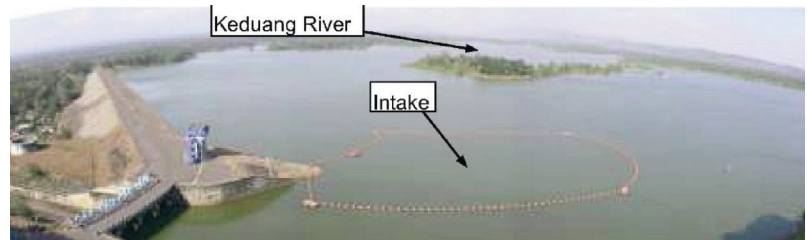


Fig. 11. Vista del embalse de Wonogiri en Indonesia antes de la estación seca.



Fig. 12. Vista del embalse de Wonogiri en Indonesia antes de la estación húmeda.

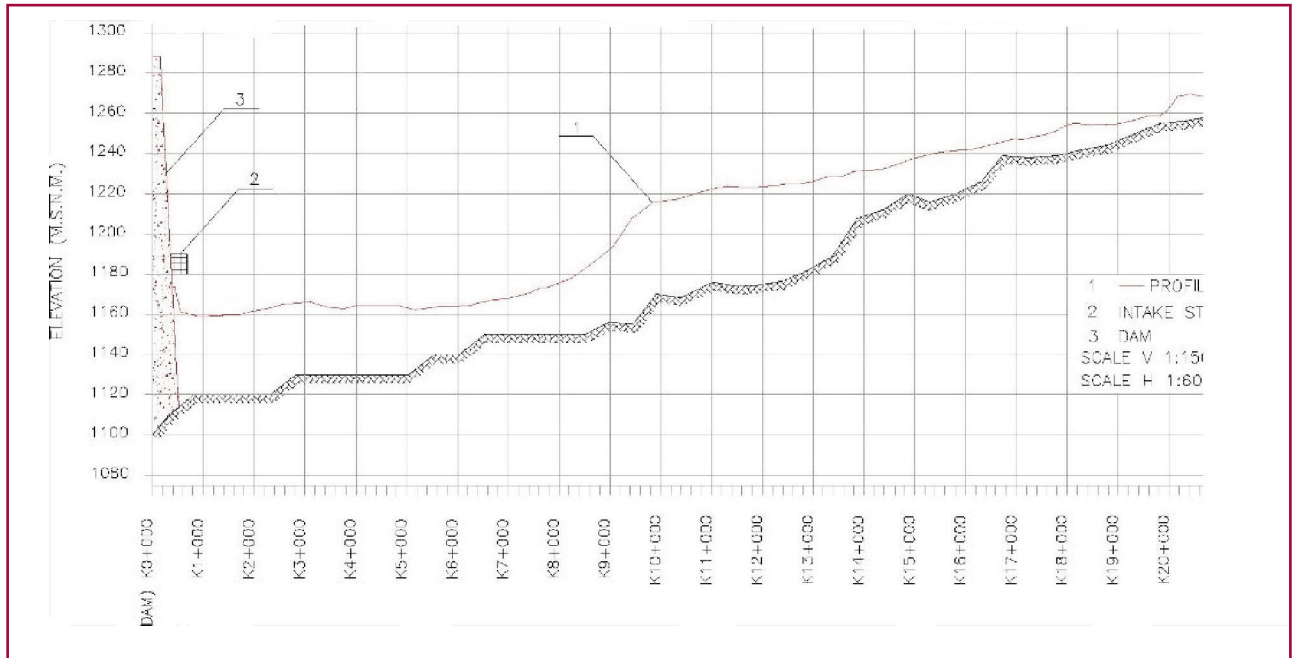
análisis detallado de las propiedades físicas de los sedimentos depositados en el embalse. Se evaluaron diversas opciones para la gestión de la sedimentación en los embalses. Estas medidas incluían abandonar el status quo, y construir presas de retención, hidrosucción, evacuación mecánica y un proyecto de mejora de las estructuras destinado a aumentar el embalse muerto y modificar también el nivel mínimo de funcionamiento en el embalse. A largo plazo, las alternativas favorables que se consideraron incluyeron la instalación de paneles metálicos para elevar la base de las rejillas y la construcción de tomas nuevas que se diseñarían con un nivel más elevado de la base de rejillas. La alternativa de incrementar la altura de la base de las rejillas, por ejemplo 40 m retrasaría la entrada de sedimentos en el fondo alrededor de 55 años.

Una serie de embalses en Rusia también sufren problemas de sedimentación. Estudios realizados por Aliev y otros en algunas de estas presas llegaron a la conclusión de que el lavado proporcionaba resultados muy limitados en la lucha contra la sedimentación. Sin embargo, una serie de consideraciones en el diseño indican que para un lavado eficiente hay que considerar la posición óptima de los desagües fondo y la ubicación del aliviadero. Por último, la opción más eficiente consiste en la construcción de presas aguas arriba del embalse final, que actúan como estructuras de retención de sedimentos.

Hussain, de Pakistán, analiza el estudio y la simulación de la sedimentación en los embalses y el análisis



Fig. 13. Perfil de sedimentos en el embalse de Chivor en Colombia.



de los efectos de otras medidas de gestión de los sedimentos mediante modelos numéricos. Este concepto se presenta a través de un ejemplo ilustrativo del estudio que se llevó a cabo para el proyecto del embalse de Diamer Basha. Las medidas de gestión de los sedimentos que se proponen y la simulación numérica, incluyen operaciones de lavado en el embalse, la elevación del nivel mínimo de funcionamiento y el desarrollo de presas aguas arriba para reducir el flujo entrada de sedimentos al embalse. Se estimó la eficiencia y la prioridad de las alternativas anteriormente

Fig. 14. Dique de retención aguas arriba de la presa de Krímov.



mencionadas. Sin embargo, la construcción de una presa en las cuencas superiores indias ha resultado ser la medida más eficaz en lo que respecta a lograr una alta capacidad de almacenamiento útil y el retraso del avance de los sedimentos del delta. Se ha comprobado que la elevación del nivel mínimo de funcionamiento en el embalse también proporciona importantes beneficios en la gestión de la sedimentación.

La ponencia de Motlik (República Checa) trata sobre el régimen de control de sedimentos de los cursos de agua y embalses en el noroeste de Bohemia. Es interesante observar que en la República Checa, la experiencia ha demostrado que la construcción de trampas de árido en todos los arroyos de las montañas permiten atrapar y retener considerables cantidades de residuos flotantes y con ello protegen los ríos de la recepción de los sedimentos. Los diques de retención se limpian regularmente con el fin de eliminar los sedimentos recogidos. En la presa de Flaje se construirán cinco embalses de retención aguas arriba del embalse en los cinco arroyos que llegan al embalse.

La presa Alesani en Francia es una de las presas amenazada por los sedimentos, y que requiere intervenciones urgentes. Según Paoli, y otros, los sedimentos habían obstruido los desagües de fondo, así como la mitad de la altura de la toma de agua. Esto es así porque la estructura de la torre de toma está formada por una torre sumergida equipada con una válvula y sobre ella un cilindro perforado. Las medidas que se





Fig. 15. La toma de agua de la presa Alesani en Francia esta obstruida por sedimentos hasta 2/3 de su altura. A la derecha, Fig. 16. Nueva torre de toma de la presa Alesani en Francia.

llevaron a cabo incluyen el aumento de la toma de agua mediante la instalación de un cuerpo prefabricado montado sobre un pontón. Este ejercicio consiguió restablecer el funcionamiento normal de la presa y embalse. Esta fue una medida temporal, con otras posibles medidas permanentes que se están investigando y planificando como un cono parcial de decantación alrededor de la torre de toma y el lavado asistido de sedimentos en suspensión.

En Marruecos, el diseño de los embalses incorpora un embalse muerto que podría colmatarse por sedimentos transcurridos más de 50 años. Sin embargo, como observó por Hasnaoui y otros, la mayoría de los embalses ahora están teniendo importantes problemas de sedimentación. Las medidas adicionales que actualmente están siendo aplicadas son: el tratamiento de las laderas del embalse y la construcción de diques de retención para reducir el aterramiento en las presas principales. En algunos embalses se han recrecido las presas para aumentar su capacidad.

Tema 4: Consideraciones generales sobre la gestión sostenible de sedimentos

Algunas ponencias tratan en general de las soluciones a considerar en la gestión de la sedimentación en los embalses. Uno de los principales puntos considerados fue cambiar el diseño de los criterios de análisis económico que incluya en el enfoque el ciclo de vida y el coste de desmantelamiento. También se discutió sobre la armonización de las políticas relacionadas con el medio ambiente y los sedimentos.

Tradicionalmente, las presas se han diseñado en base al principio de vida útil. Annandale y Palmieri sugieren la necesidad de sustituir la idea de vida útil por el enfoque de ciclo de vida. La principal diferencia

entre los dos conceptos es la aplicación del análisis económico y la optimización. El documento hace hincapié en la necesidad de la equidad intergeneracional. A través del ciclo de vida se tiene en cuenta la equidad entre generaciones. Existe la necesidad de garantizar que, si bien las necesidades de las generaciones actuales están satisfechas por la instalación, las generaciones futuras nunca deben ser perjudicadas por dicho uso. Este enfoque requiere la integración de los fondos de amortización para proporcionar recursos financieros para las acciones que sean necesarias para las futuras generaciones y garantizar la sostenibilidad. El enfoque de la gestión del ciclo de vida en el aspecto cíclico se centre en todas las actividades de diseño, construcción, ejecución, operación, mantenimiento y planificación. En esencia, esto significa que los actuales usuarios de la instalación están en condiciones de aceptar la obligación de pagar el desman-

Fig. 17. Presa de Ibn Battouta en Marruecos



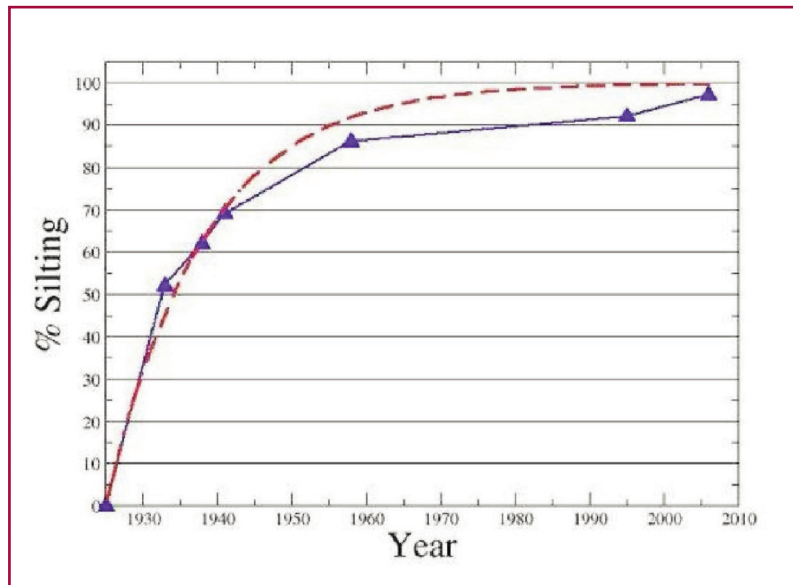


Fig. 18. Evolución de la sedimentación en el embalse de Quarto en Italia.

telamiento de la instalación o sustitución que puedan ser necesarias más tarde. Los proyectos sólo pueden ser realmente viables si se consideran viables a perpetuidad. Esto se presenta como un desafío que debe ser incorporado en el análisis económico de las presas.

El caso de la sedimentación en los embalses de las grandes presas italianas es un claro testimonio de la cuestión de las medidas de control de sedimentos frente a las preocupaciones ambientales a menudo limitrofes con políticas antagónicas. Este fenómeno se analiza en un documento de Bizzini y otros. Muestran el fracaso en la aplicación de algunas de las medidas contra la sedimentación, ya que pueden chocar con las políticas ambientales y la legislación. El documento concluye que los problemas de gestión de los sedimentos se han exacerbado por la falta de leyes en vigor debido a su incapacidad para abarcar tanto las necesidades de gestión de sedimentos, como las necesidades de gestión ambiental.

En la cuenca del Durance en Francia, el problema de la sedimentación se ve agravado por las características específicas de la cuenca, en particular por sus altas tasas de erosión. Esto ha afectado de manera importante en el funcionamiento de los embalses debido a las elevadas tasas de sedimentación. Según Bouchard, y Menú Poirel, este escenario requiere la aplicación de medidas enérgicas de gestión en las cuencas vertientes a los embalses. El documento analiza el estudio sobre la formación de sedimentos en el embalse y su transporte a través de la red hidráulica. El

estudio también analiza la concentración de sedimentos en los embalses. Se ha desarrollado un modelo numérico de la red hidráulica para simular el transporte de sedimentos y la sedimentación en el embalse. A partir de los resultados de este modelo, fue posible alcanzar los requisitos del nuevo concepto denominado "estado de destino". Este concepto se refiere a la necesidad de contar con embalses que sean capaces de realizar de manera eficaz y eficiente sus funciones específicas, es decir: la producción de energía, el abastecimiento de agua, la laminación de avenidas, las actividades de recreo, etc. Se aconseja el suministro y adecuada actualización de las indicaciones del sistema operativo. Esto se consigue mediante la incorporación de instrucciones relevantes de ejecución para los equipos e instalaciones, basadas en los resultados del modelo.

Shalaby ofrece una visión general del estado de la sedimentación en la presa de Asuán en Egipto. El documento ofrece los resultados de los reconocimientos y el seguimiento de sedimentos que se han llevado a cabo en la presa de Asuán. Asimismo, pro-



Fig. 19. Embalses en el Nilo.



porciona los resultados de las mediciones de velocidad de agua con el correspondiente control sobre el comportamiento y el volumen de los materiales de fondo y en suspensión. A partir de estos estudios se ha constatado que en la presa de Asuán hay considerables volúmenes de sedimentos depositados. El artículo propone numerosas medidas para tratar el problema de la sedimentación en el embalse. Algunas de las medidas propuestas incluyen, entre otras, el dragado, la construcción y explotación de un canal de derivación, y la gestión de la cuenca. La viabilidad de estas medidas no se ha estudiado en detalle hasta ahora como para garantizar la aplicación a corto plazo.

Miroslav y Michal describen el modo de gestionar el problema de la sedimentación en Eslovaquia. El documento analiza el grado de sedimentación en los embalses en Eslovaquia partiendo de los datos obtenidos en las operaciones de control de los mismos. Las medidas presentadas no sólo tienen que ver con la eliminación de sedimentos, también se han presentado otros métodos de gestión de la sedimentación. Miroslav y Michal informan que en Eslovaquia hay algunos embalses necesitan un dragado continuo. Otra medida es la construcción de pequeños embalses trampa lo largo de los arroyos que fluyen hacia los embalses. Esta medida se realizó en algunos embalses mientras que en otros también se han construido estructuras deflectoras que son fundamentales en la conducción de los sedimentos a zonas predeterminadas de los embalses, generalmente a zonas ya destinadas al embalse muerto. La aplicación de este método garantiza que, a pesar de los sedimentos son transportados hacia el interior del embalse, no perturben el funcionamiento de la presa. El dragado del embalse de Hricov se realizó anualmente entre 1991 y 2004 con un coste elevado. Entre 1989 y 2002 el dragado ha estado relacionado con las operaciones de lavado. Se encontró que la eficacia de lavado es mucho mayor en comparación con el dragado aunque parece seguir aumentando con el tiempo. Por lo tanto, se han creado modelos hidrodinámicos de 1 y 2 dimensiones con el fin de analizar el comportamiento de los sedimentos, para identificar los lugares que son vulnerables a la sedimentación y para evaluar la eficacia de lavado del embalse. La simulación numérica también se utilizó con objetivos similares. Algunas de las medidas que se recomendaron fue el dragado por succión, así como la construcción de deflectores de

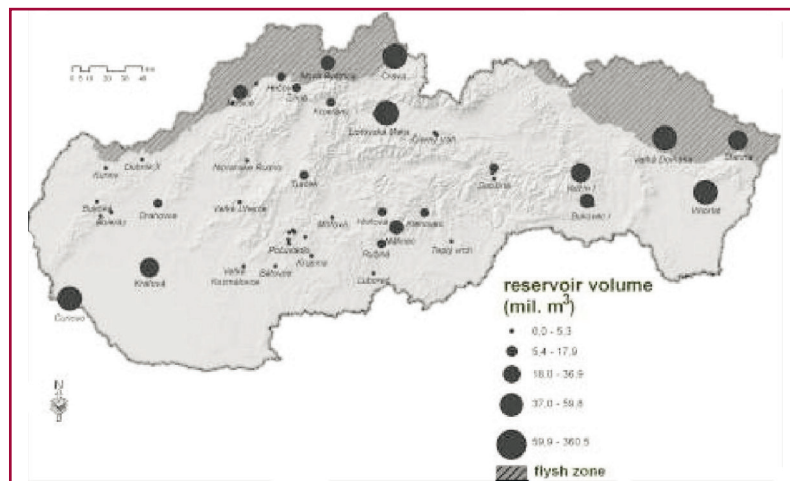


Fig. 20. Embalses en Eslovaquia registrados por el ICOLD.

mayor tamaño para dirigir el flujo de sedimentos lejos de la presa.

Aoyama y otros tratan en su ponencia la cuestión de las presas de laminación de avenidas. El documento analiza el impacto de la laminación de avenidas en la gestión de los sedimentos en las cuencas y los embalses teniendo en cuenta que sólo almacenan el agua durante las avenidas. Los autores presentaron sus conclusiones basándose en una serie de presas de laminación en Japón. Se utilizó un modelo físico para simular y evaluar la continuidad del movimiento de sedimentos en una presa de laminación de avenidas. Se investigó también el impacto en el cauce aguas abajo. Los resultados del modelo concluyeron que la grava y la arena no se descargan, mientras que el nivel de agua en el embalse está aumentando rápidamente.

Fig. 21. Vista desde aguas arriba de la presa de Masudagawa en Japón.





mente, sino más bien cuando el nivel de agua ha disminuido. También se observó que por el hecho de tener almacenada la avenida de proyecto, las propiedades de la descarga de sedimentos es inevitablemente diferente comparado con la típica descarga de sedimentos naturales. No se puede establecer una relación en el cambio de las propiedades observadas, ya que depende de las características particulares de cada presa. A la vista de esto, el documento recomienda la necesidad de estudiar cada tipo de aportación al embalse con respecto a las propiedades de sedimentos entrantes, nivel de avenida y laminación de avenidas y el modo de operación antes de la construcción de la presa.

En la mayoría de los casos, se considera que los depósitos de sedimentos no tienen ningún valor económico. Sin embargo, los actuales estudios de Toyoda y otros están destinados a investigar la posibilidad de utilización efectiva de los depósitos húmicos de la parte inferior de los embalses. El estudio fue dirigido a analizar las características químicas de los depósitos húmicos para determinar si están compuestos de algunos materiales de valor económico. Se ha determinado específicamente la disponibilidad de depósitos húmicos en el fango de los embalses en diversas estaciones de muestreo en una serie de presas. Se llegó a la conclusión de que los depósitos húmicos se producían y estaban disponibles en el fondo de los embalses. Basándose en el estudio, se llevarán a cabo pruebas en varias zonas costeras

Fig. 22. Experiencias en la costa de Shaguma en Hokkaido, Japón.

Fig. 23. Presa de Elche.



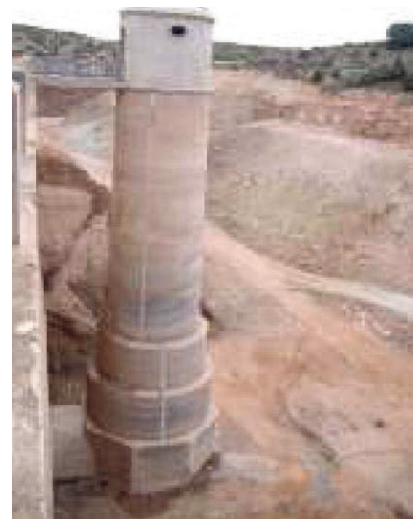
de tierras áridas para tratar de aplicar la tecnología de los depósitos húmicos naturales en la recuperación de la vegetación.

4. Ponencias de autores españoles

Dentro del Tema 2: Gestión de la sedimentación en los embalses mediante el dragado, hidrosucción o trasvase se presentaron dos ponencias de autores españoles

Soluciones a la sedimentación de los embalses del sur de España

Silvia García Wolfrum, Alejandro Mosquera y Pablo García Cerezo presentan varios casos de presas en las cuencas hidrográficas de los ríos Júcar y Segura: Elche, Elda, Valdeinfierno, Almansa y Puentes, todas ellas con más de cien años de antigüedad, en las cuales se ha producido la sedimentación, y las respectivas soluciones o tratamientos que se han utilizado. La mayor parte de las presas en España son antiguas, con más de 50 años de servicio. En esta zona las precipitaciones son muy irregulares, causando importantes lavados del suelo seco en cada episodio de tormentas. Con estas condiciones, y considerando los problemas de arrastres existentes, el aterramiento de las presas es prácticamente inevitable, o al menos, no se ha contado a lo largo del tiempo con los medios y sistemas precisos para evitarlo.



Las soluciones son diversas en función del escenario específico de la sedimentación. En algunas presas se ha producido tanta acumulación que se han desarrollado algunas especies de plantas protegidas, llevándose a cabo planes o propuestas de reconversión del embalse en áreas recreativas. En la presa de Valdeinfierno, se decidió que la construcción de una nueva presa aguas arriba era una solución factible tras considerar los condicionantes de otras alternativas como la mejora o rehabilitación de la presa actual. En la presa de Almansa, se realizó una mejora del embalse en 2007 mediante dragado, rehabilitación del vertido y reparación del cauce del Alpera. Dos presas auxiliares se utilizaron como recipiente para el recogido de los lodos. Estos

son sólo algunas de las medidas de control de gestión de sedimentos que se están llevando a cabo en el sureste español.

Estudio de la sedimentación del futuro embalse de Terrateig

El artículo de Gabriela Mañueco, Nuria Segura, Eduardo Saleté Díaz, Eduardo Saleté Casino, Sara Bernia y Jesús Pernas, presenta la metodología y principales resultados del estudio de sedimentación antes de la construcción de la presa de Terrateig en la cuenca del río Vernissa en Valencia. Se realiza una estimación de la degradación de los 77,1 km² de cuenca por medio de la metodología habitual. También se

A la izquierda, Fig. 24. Sedimentos en el embalse de Almansa. A la derecha, Fig. 25. Estado del embalse de Almansa después de terminar los trabajos.

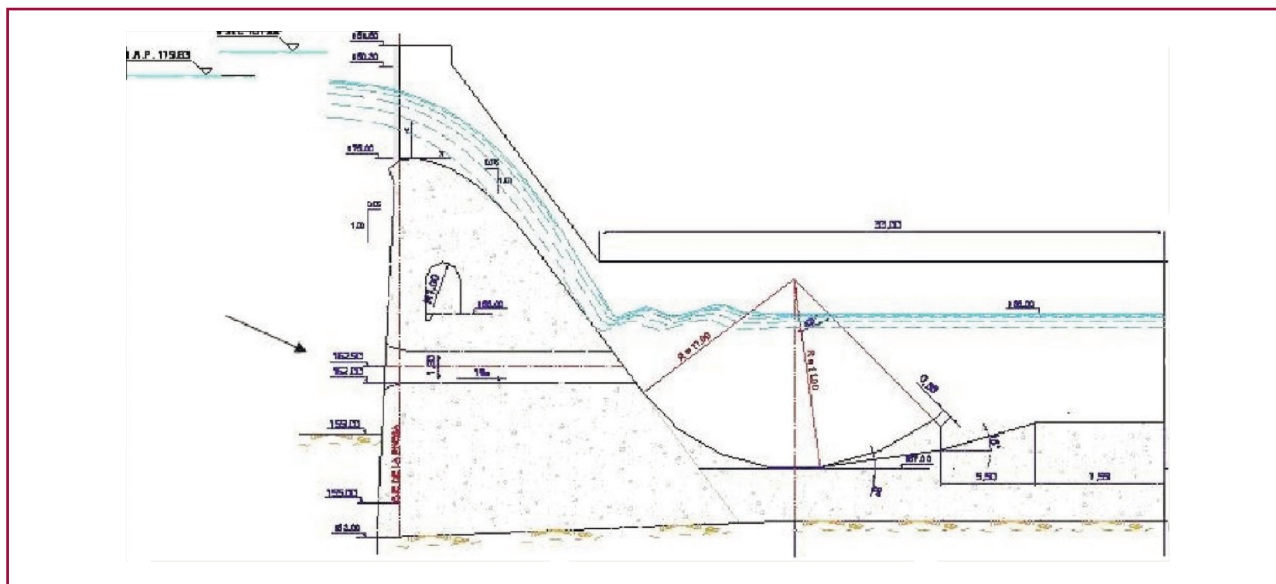
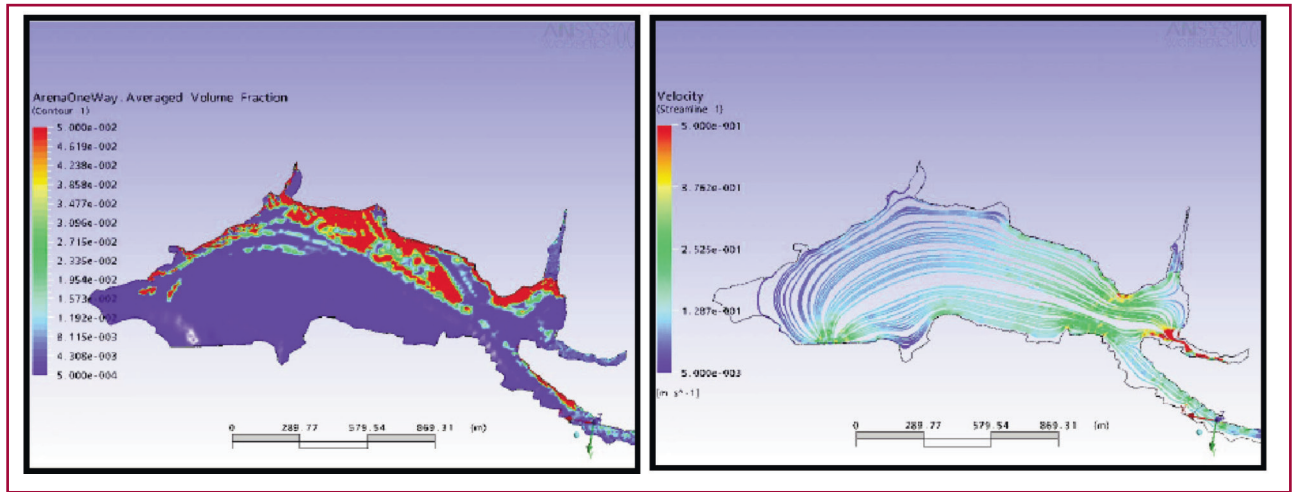


Fig. 26. Sección transversal de la presa de Terrateig.



Fig 27. Ubicación y concentración de los sedimentos y líneas de corriente para la avenida de T = 1000 años en el embalse de Terrateig.



utilizaron los resultados de los análisis de las muestras representativas de las formaciones superficiales de los diferentes usos del suelo en la cuenca. La información del estudio de la erosión de la cuenca se incorporó a las simulaciones realizadas con un modelo de elementos finitos en 3D, a fin de obtener los volúmenes y la distribución de los sedimentos en la cuenca y el análisis de impactos negativos sobre la operación de presas para los diferentes escenarios.

El modelo utilizado predice los lugares y las concentraciones de los depósitos en la cuenca del embalse por la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando un diagrama de volumen finito. Según el

modelo la mayoría de los sedimentos que entran en la cuenca se sedimentarán en la orilla opuesta de la presa. Por otra parte, se estima que más del 88% de los sedimentos que entran en el embalse serán retenidos en él. Se tienen que adoptar normas de mantenimiento con el fin de eliminar los sedimentos del embalse periódicamente.

5. Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de Tamara Ramos y Sara Pliego en la realización de este artículo. ♦