

**MODELO HIDRODINÁMICO DEL EMBALSE DE ALMACENAMIENTO  
DE LA PLANTA HIDROLÉCTRICA AGUAS ZARCAS**

*Lucrecia Alvarez Barrantes<sup>1</sup> y Rafael Murillo Muñoz<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, Costa Rica  
lualvarez@gmail.com*

*<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica  
Rafael.Murillo@ucr.ac.cr*

**RESUMEN:**

Esta investigación se enfocó en realizar un análisis de las corrientes de flujo dentro de un embalse para determinar la causa de la acumulación de sedimentos. Se utilizó un programa de flujo bidimensional, en el cual se determinó la magnitud y dirección de los vectores de velocidad del flujo en dos escenarios de operación de la planta hidroeléctrica. De los resultados del modelo se encontró que las características geométricas del embalse hacen que el patrón de flujo este formado por varios vórtices que proporcionan zonas de velocidades bajas, que inducen a la formación de islas de sedimentos. Finalmente, se plantean cambios en la geometría del embalse, para modificar el patrón de flujo y tratar de disminuir la sedimentación.

**ABSTRACT:**

This research focused on an analysis of current flow within a reservoir to determine the cause of sediment accumulation. A two-dimensional flow software was used to determine the magnitude and direction of flow velocity vectors in two stages of operation of the hydroelectric plant. From the model results it was found that the geometric characteristics of the reservoir make the flow pattern consists of a number vortexes that provide low speed zones, which induce the formation of sediment islands. Finally, a proposal is made of changes in the geometry of the reservoir, to modify the flow pattern and try to reduce sedimentation.

**PALABRAS CLAVES:** modelado en dos dimensiones, transporte de sedimentos; embalses

## INTRODUCCIÓN

Es de suma importancia estudiar la sedimentación natural que aportan los ríos a los embalses, esto con el fin de garantizar el funcionamiento para el cual la obra fue diseñado. Cuando un embalse de una planta hidroeléctrica acumula un volumen de sedimento superior al de diseño, se convierte en una problemática que afecta el rendimiento de la planta y por lo tanto su capacidad de generación. Este es el caso de la Planta Hidroeléctrica Aguas Zarcas ubicada en Costa Rica, donde la acumulación de sedimentos dentro del embalse ha provocado una disminución de aproximadamente 40% en su volumen de almacenamiento. El sedimento se halla distribuido en todo el embalse y se encuentra tan consolidado que la vegetación ha tenido la capacidad de formarse. Como consecuencia de esta acumulación el embalse ha sufrido una disminución de su volumen útil.

Este trabajo se enfocó en realizar un análisis de las corrientes de flujo dentro del embalse para determinar la causa de la acumulación de sedimentos. Para realizar este análisis se utilizó un programa de flujo bidimensional, generando un modelo que determinó la magnitud y dirección de los vectores de velocidad. Se encontró que las características geométricas del embalse hacen que el patrón de flujo este formado por varios vórtices generando zonas de velocidades bajas. Se comparó el modelo hidrodinámico con la situación actual del embalse, y se encontraron resultados satisfactorios. Se estudiaron cambios en la configuración del embalse con el fin de mejorar el patrón de flujo y disminuir la sedimentación.

## MODELADO HIDRONÁMICO DEL EMBALSE

El arrastre de sedimentos en las corrientes y ríos está relacionado con la velocidad del flujo principalmente y por lo tanto es la que determina si un grano permanece en reposo o es transportado. Es por ello que las condiciones de flujo en un embalse tienen un papel fundamental en el transporte de sedimentos. Estas condiciones hidrodinámicas están descritas por las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales. Es por esto que se realizó un modelo hidrodinámico bidimensional del embalse de la central hidroeléctrica, con el fin de determinar el comportamiento del flujo dentro del embalse, el modelado se realizó por medio del programa de flujo bidimensional River2D. Luego se verificaron los resultados de modelo hidráulico con el fin de localizar las zonas en donde se encuentran los sedimentos, para determinar y cuantificar las causas de la acumulación de sedimentos en el embalse.

El embalse de almacenamiento de la central hidroeléctrica es artificial, se encuentra recubierto por un geotextil y su geometría en planta es irregular en forma de "hueso" (Fig. 1). Tiene una profundidad de 5 m con taludes 1V:2H, su ancho en la parte más amplia es de aproximadamente de 175 m y su largo es de 350 m, este posee un volumen de  $101.300 \text{ m}^3$  en un área de  $24.900 \text{ m}^2$ . Fue diseñado para almacenar  $65.900 \text{ m}^3$  con una profundidad de 3,5 m y un borde libre de 1,5 m, y su nivel mínimo es 0,5 m, para  $8.000 \text{ m}^3$  de volumen muerto y un volumen útil de  $57900 \text{ m}^3$ . Sus obras de entrada y salida se componen de una rápida por donde ingresan un caudal constante de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  proveniente de un canal, una antecámara que lleva el caudal de salida hasta la casa de máquinas y un aliviadero que es el encargado de verter el agua más allá de los 3,5 m de profundidad.

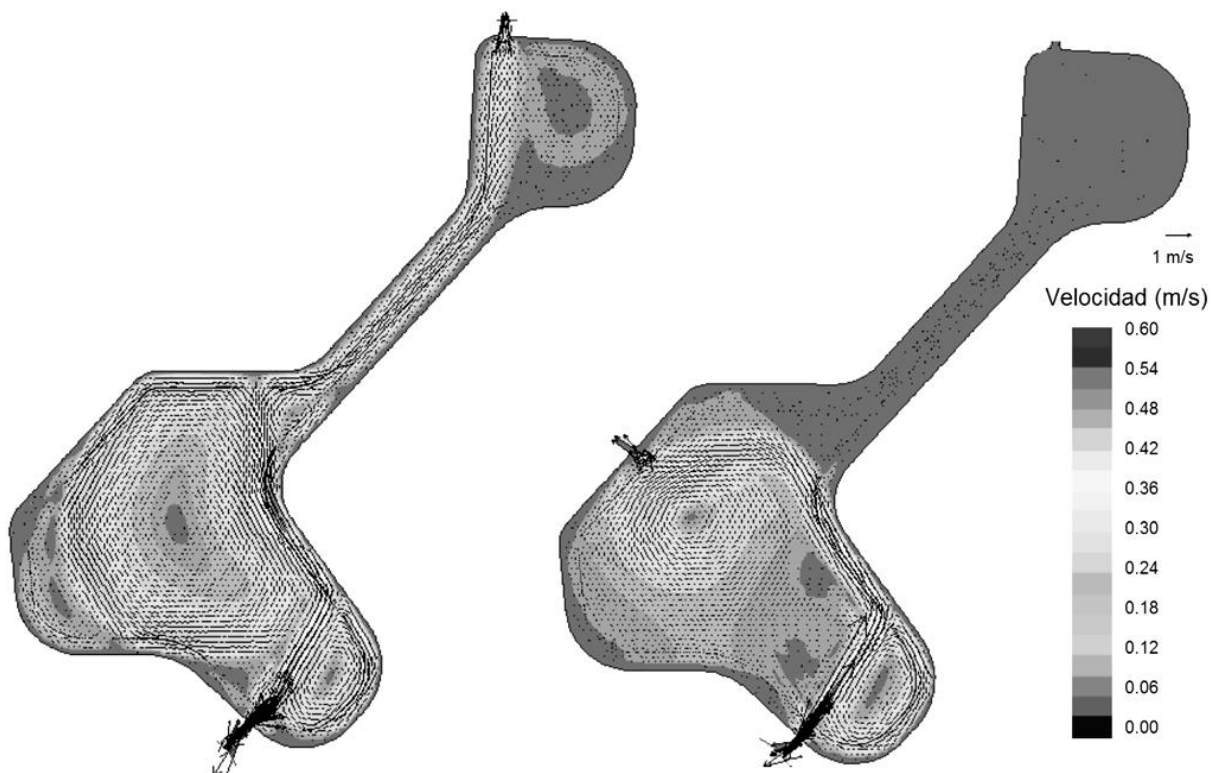
El agua que proviene del canal principal ingresa al embalse por medio de una rápida. Cuatro metros antes del embalse el canal principal cambia su sección trapecial a una sección rectangular de 2.1 m de ancho, para ingresar a un nueva estructura que se profundiza en los taludes del embalse. El flujo es llevado por el nuevo canal rectangular a lo largo de 10.67 m y una pendiente del 35.9%, hasta 2 m abajo del nivel general del embalse (363.5 m.s.n.m). Luego continúa un canal horizontal de 8.65 m de largo en donde concluye la obra con una grada en donde el flujo es reintegrado al nivel normal del embalse. En esta parte se sitúa una escollera de piedra con un área de aproximadamente  $80 \text{ m}^2$  para amortiguar la turbulencia que genera la rápida. A la salida, la

antecámara se introduce en los taludes del embalse hasta descender 3 m debajo del fondo del mismo. En este punto el agua pasa a través de las ataguías y 4 m después llega hasta la tubería forzada de 1.2 m de diámetro. La antecámara tiene 3.4 m de ancho.

El modelo hidrodinámico del embalse de almacenamiento se realizó por medio del programa River2D, el cual es un programa que modela flujo en dos dimensiones a partir del elemento finito, desarrollado específicamente para ser empleado en canales artificiales y ríos; fue creado en la Universidad de Alberta, Canadá. Dentro de sus capacidades de solución se encuentra modelar transiciones de flujo subcrítico a supercrítico. El modelo bidimensional que utiliza el River2D está basado en las ecuaciones de Saint Venant expresadas de forma conservadora, las cuales corresponden a una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes, resueltas por el esquema de Petrov-Galerkin en las unidades del Sistema Internacional. El programa contiene 4 aplicaciones: R2D\_Bed, River2D\_Mesh, River2D\_Ice y River2D. Cada aplicación es necesaria para obtener el modelo en dos dimensiones.

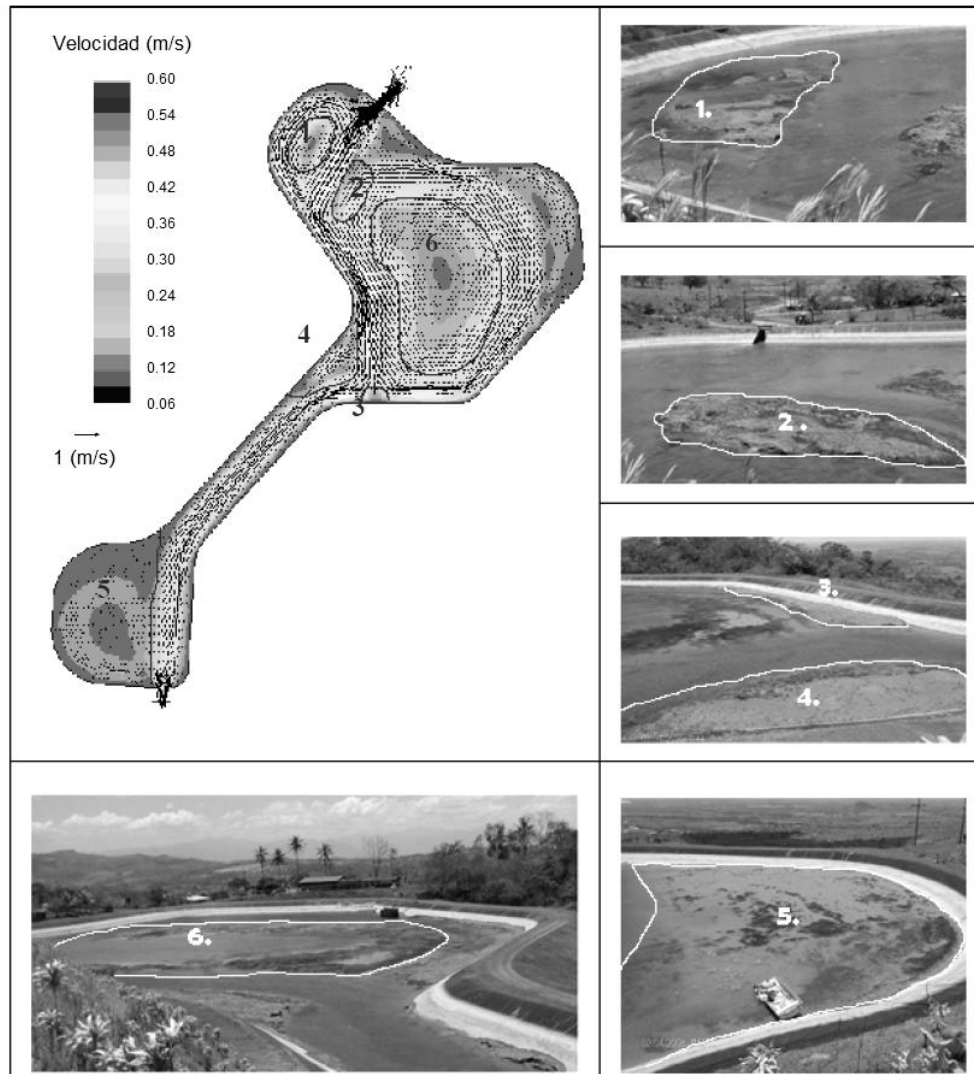
Para realizar el modelado hidrodinámico del embalse se utilizó la topografía indicada en los planos constructivos del embalse, la cual fue descrita anteriormente. Para la condición de entrada se utilizó un caudal de diseño de la planta  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  y la condición salida corresponde a la altura máxima a la cual se encuentra el agua (3,5 m). Como el embalse tiene un geotextil la  $n$  de Manning que se seleccionó fue 0,011. El aliviadero se modeló como un vertedor cuadrado de 6 m de ancho. Los nodos de la malla se colocaron aproximadamente cada 2,5 m. El nivel del agua inicial del embalse fue de 3,5 m, el modelado se realizó sin los sedimentos y en estado de flujo permanente. Se modelaron dos escenarios, el primero representa cuando el embalse opera en su capacidad máxima de generación, y el segundo cuando el embalse no está operando y el exceso de caudal es vertido por el vertedor.

En la figura 1 se muestra los resultados del modelado hidrodinámico del embalse de almacenamiento de la Planta Hidroeléctrica Aguas Zarcas, en ambas condiciones los valores de velocidad son menores a los 0,6 m/s. El comportamiento de las líneas de flujo en la parte ancha del embalse es muy similar cuando la condición de salida es la antecámara o el aliviadero.



**Figura 1.-** Modelo hidrodinámico del embalse de almacenamiento de la Planta Hidroeléctrica Aguas Zarcas.  
A) Escenario 1: Condición de salida es la antecámara. B) Escenario 2: Condición de salida es el aliviadero.

Para corroborar los resultados del modelo, se realizaron visitas a la planta hidroeléctrica con el fin de observar el patrón de flujo y ubicar la acumulación de sedimentos dentro del embalse. Por medio de la presencia de una espuma que naturalmente circulaba se encontró un patrón de flujo definido por flujos circulares o rotatorios, con trayectorias de corrientes cerradas (vórtices), similar a la representada por el modelado hidráulico. Además se observó que prácticamente todas las áreas con velocidades menores a los 0,12 m/s existe una isla consolidada de sedimentos. La disposición de los depósitos sugerida por el modelo hidrodinámico coincidía satisfactoriamente con lo observado en campo, esto se puede observar en el esquema presentado en la Fig. 2.



**Figura 2.-** Comparación de las áreas de velocidades menores a los 0,12 m/s del modelo hidrodinámico con la ubicación y geometría de los depósitos de sedimento dentro del embalse.

Para validar la consistencia de los datos obtenidos de velocidades que proporciona el River2D se elaboró un modelado de la distribución del tamaño de partícula que sedimenta dentro del embalse. Con base en la teoría del desarenador en donde se sabe que la velocidad de caída ( $w$ ) de una partícula es:

$$w = \frac{h \cdot v}{L} \quad [1]$$

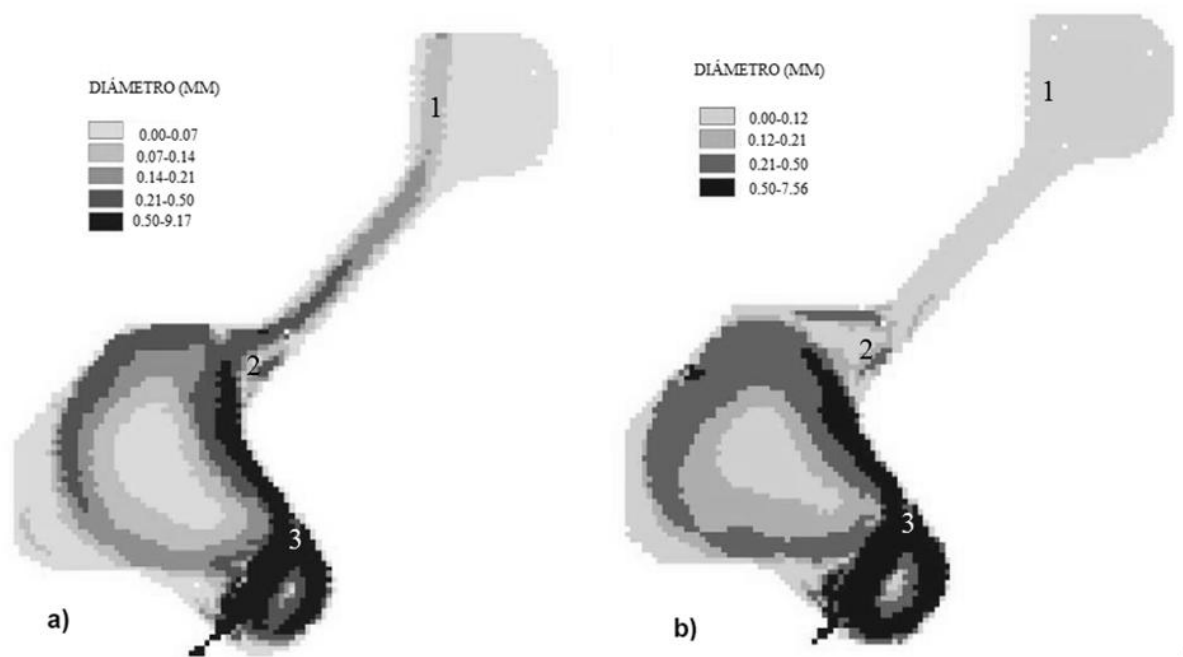
Donde

$h$ : altura del agua

$L$ : longitud horizontal que recorre la partícula

$v$ : Velocidad horizontal del agua

A partir de la dirección de los vectores de velocidad se aproximaron todos los recorridos que podía hacer el agua dentro del embalse y se propuso la longitud horizontal “L”. Con los datos de velocidad horizontal que generó el modelo hidrodinámico y un valor “h” igual a 3.5 m se encontró las velocidades de caída “w”, y se determinó la distribución del tamaño de partícula que sedimenta dentro del embalse, según el gráfico velocidad de caída de una partícula en función del diámetro de una partícula de VAWE (1978). Estos resultados se muestran en la Fig. 3, los cuales se compararon con 3 pruebas granulométricas que se le realizó al sedimento dentro del embalse en los puntos indicados en la figura 3. Del análisis de resultados se encontró que la distribución teórica es muy similar a la que se encuentra en la realidad en el embalse. En los puntos 1 y 2 se da una distribución de partículas de los 0.072 mm-0.50 mm siendo congruente con la distribución granulométrica de la muestra 1 y 2, las cuales son arenas con una distribución granulométrica similar,  $d_{10} = 0.10$  y  $d_{90} = 0.47$  mm. El punto 3 indica una distribución de partículas más pequeñas reflejando los resultados de la muestra de suelos 3, donde el  $d_{10} = 0.091$  y  $d_{90} = 0.25$  mm.



**Figura 3.-**Tamaño de partícula que sedimenta según el gráfico de VAWE en el embalse cuando la condición de salida: a) la antecámara y b) aliviadero.

## CAMBIOS EN EL PATRÓN DE FLUJO

Una vez comprendida la dinámica de sedimentación del embalse, se propuso realizar cambios físicos en su geometría, para determinar cuál podría ser una mejora al embalse en la cual se disminuya las áreas de velocidades bajas, y por lo tanto la sedimentación dentro del embalse. El enfoque principal de los cambios geométricos, era determinar cuál debería ser el patrón de flujo para que las partículas que ingresan al embalse, en su mayoría sean transportadas y no se depositen en embalse. Se propuso mover la entrada actual, cambiar la geometría e incluso realizar una división del caudal de entrada. Los cambios no presentaron ningún patrón de flujo en donde no existan zonas de velocidades bajas.

En la Fig. 4 se muestran los resultados que generó el River2D ante los cambios físicos. Se trasladó la rápida hacia el lado derecho (Fig. 4.a) y luego al lado izquierdo (Fig. 4.c). Con el fin de romper la división de flujo que se da por el choque del agua con los taludes del embalse, se propuso

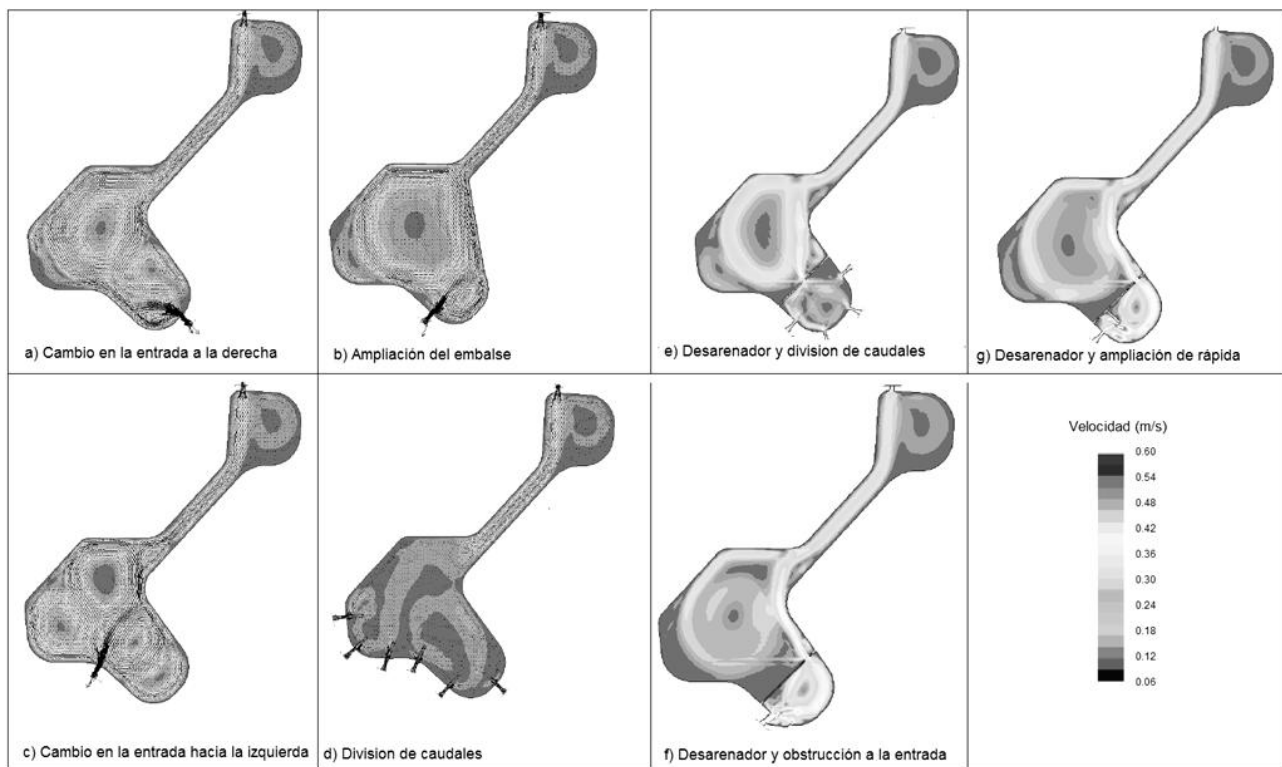
también hacer una ampliación de estas zonas (Fig.4.b). Finalmente se realizó una división de caudales disminuyendo las dimensiones de la salida lo suficiente para aumentar la velocidad del agua a la entrada, la idea principal era que el flujo ingrese con más velocidad y que las velocidades dentro del embalse aumentaran. Al comparar todos los resultados se llegó a la conclusión que por más que se le realicen cambios físicos al embalse siempre se forman vórtices que provocan zonas de velocidad cero y por lo tanto acumulación de sedimentos. Por esta razón se planteó incorporar un desarenador dentro del embalse con el fin de concentrar los sedimentos en un solo lugar y realizar la limpieza de estos.

Se creó una barrera de 5 m de profundidad, con 1 m de ancho paralela a la rápida. Al final de la barrera se colocó un vertedor rectangular de 6 m de ancho, en donde el flujo vierte y es reintegrado al embalse. Para no perder capacidad de almacenamiento se planteó el vertedor con la altura de 0.5 m sobre el fondo del embalse, la misma profundidad que el nivel mínimo.

Se propuso 3 diferentes configuraciones del desarenador dentro del embalse. La solución que generó velocidades más bajas fue en la que se realizó una división de caudales (Fig.4.e). Este desarenador tiene capacidad de sedimentar partículas mayores a 0.1 mm, reteniendo el 50 % del material que ingresa al embalse. Desde todas las entradas hasta el final del vertedor hay aproximadamente unos 50 m de largo, las velocidades en este punto son de 0.2 m/s.

Como segunda opción se colocó una barrera enfrente de la rápida actual con el propósito de que el flujo choque y pierda velocidad, lográndose que las velocidades antes del vertedor fueran de 0.3 m/s (Fig. 4.f). El efecto de que la velocidad disminuya no se dio, sin embargo el flujo se ve obligado a recorrer una mayor distancia (alrededor de los 70 m) debido a la obstrucción siendo capaz de retener partículas mayores a los 0.11 mm, logrando retener un 50% del material, nuevamente.

Finalmente se amplió la rápida para que el área fuera mayor y las velocidades de entrada fueran menores (Fig. 4.g.) El modelo presentó una velocidad de salida de 0.3 m/s teniendo capacidad de retener partículas mayores a los 0.14 mm aproximadamente, presentando una eficiencia de alrededor del 30 %. Este caso no dio resultados satisfactorios ya que las velocidades no disminuyeron lo suficiente y la distancia de recorrida disminuyó a 50 m. La opción de colocar un desarenador dentro del embalse no generó resultados tan eficientes, ya que se estaría reteniendo alrededor del 50% del material, dejando por fuera a las que partículas menores a los 0.10 mm que luego sedimentaran dentro del embalse. Además se perdería alrededor de 8000 m<sup>3</sup> de volumen, implicando una pérdida de un 11.5 % en el volumen útil.



**Figura 4.-** Resultados del modelo hidrodinámico de los cambios geométricos en el embalse y escenario con un desarenador

## CONCLUSIONES

El modelo representó la situación real del embalse, mostrando el patrón de flujo observado en el campo, e indicando donde sedimentan los sólidos. Se comprobó que las zonas muertas coincidían con la actual acumulación de sedimentos dentro del embalse y que las velocidades son menores a los 0,6 m/s. La opción de cambiar el patrón de flujo en el embalse no dio resultados satisfactorios. Se tendría que cambiar la geometría completa del embalse para lograr obtener un patrón de flujo en donde no existan zonas de velocidad cero. De aquí la importancia de realizar un modelo hidrodinámico en el proceso de diseño de un embalse de almacenamiento. Alternativamente se debería de estudiar la introducción de un sedimentador adicional, pues ya existe un desgravador, entre la toma de aguas y la entrada al embalse. Finalmente se recomienda utilizar un modelado hidrodinámico en los embalses artificiales para predecir la dinámica de los sedimentos, así dimensionar cualquier obra necesaria para mejorar el funcionamiento.

## REFERENCIAS

- Alvarez Barrantes, L.** (2008). "Modelo hidrodinámico del embalse de almacenamiento de la Planta Hidroeléctrica Aguas Zarcas". Proyecto de Graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Chaudhry, M.H.** (1993). *Open-Channel Flow*. Prentice-Hall, Inc Englewood Cliffs, New Jersey.
- Chow, V.** (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Corrales, J.P.** (2007). "Análisis de la problemática de los sedimentos en un embalse pequeño de almacenamiento y sus posibles soluciones". Proyecto de Graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Herrera, E.** (1978). "Arrastre de sedimentos en canales naturales". Tesis de grado en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

- López, J.C.** (2001). "Análisis de la producción de sedimentos en la cuenca del Río Bananito y la estabilidad lateral del río". Proyecto de Graduación de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Rocha A.** (1978). *Introducción teórica al estudio de bocatomas*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Steffler, P; Blackburn J.** (2002). *Mesh generation program for River2D two dimensional depth averaged for finite element, User`s Manual*. University of Alberta, Canada.
- Steffler, P.** (2002). *Bed Topography file editor, User`s Manual*. University of Alberta, Canada.
- Steffler, P; Blackburn J.** (2002). *Two-Dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat, River2D Tutorial-The Basics*. University of Alberta, Canada.
- Steffler, P; Waddle T.** (2002). *Two-Dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat, Introduction to depth averaged modeling and user`s manual*. University of Alberta, Canada.
- Villalobos, M.A.** (1991). "Algunos aspectos analíticos funcionales en la teoría de elementos finitos aplicado fundamentalmente a las ecuaciones de Navier-Stokes. Proyecto de Graduación de Licenciatura en Matemática, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Bureau of Trails,** (1994). *Best Management Practice for Erosion Control During Trail Maintenance and Construction*. Department of Resources and Economic Development Division of Parks and Recreation, United States.