

PRESAS PARA EL CONTROL DE FLUJOS TORRENCIALES EN EL ESTADO VARGAS, VENEZUELA

José Luis López⁽¹⁾, David Pérez Hernández⁽²⁾ y Caudex V. Peñaranda⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto de Mecánica de Fluidos, ⁽²⁾Departamento de Hidrometeorología, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Apartado postal 47725, Caracas 1041-A, Venezuela, Telf. 58-212-6053131
E-mail: jlopez@imf.ing.ucv.ve; dph@imf.ing.ucv.ve; vpengaranda50@yahoo.com

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de una investigación que se está iniciando con el objeto de evaluar el funcionamiento de las diferentes presas construidas en el Estado Vargas, Venezuela, a raíz de la ocurrencia de los catastróficos aludes torrenciales de Diciembre de 1999. Se describen las principales características de las presas de control de sedimentos, abiertas y cerradas, y se discute su comportamiento hidráulico después de estar sometidas a las crecientes extraordinarias del año 2005. Los resultados de una investigación de campo han permitido determinar los perfiles del lecho y las características de los depósitos sedimentarios acumulados aguas arriba de las presas. Se aplica un modelo teórico basado en las condiciones de movimiento incipiente en flujos macrorugosos para estimar la pendiente de equilibrio del material retenido aguas arriba de las presas.

ABSTRACT

In this paper preliminary results are presented related to a research that has just started in order to evaluate the performance of the sediment control dams built in the State of Vargas, Venezuela, after the catastrophic debris flows of December 1999. The main characteristics of the open and closed dams are described and the behavior of the structures, when a large flood hit the same area in February 2005, is discussed. The results of a field work have allowed determining the bed profiles and the characteristics of the accumulated sediment deposits upstream of the dams. A theoretical model based on the incipient motion criteria for macro-roughness flows is applied to estimate the equilibrium slope of the retained sediment material upstream of the dams.

INTRODUCCIÓN

Los extraordinarios flujos torrenciales que ocurrieron en Venezuela en Diciembre de 1999 causaron uno de los peores desastres de origen natural en América Latina, arrasando con poblaciones enteras que se habían asentado a lo largo del litoral costero en el Estado Vargas. Las pérdidas materiales superaron los 4 mil millones de dólares y aproximadamente 15.000 personas perdieron la vida. El gobierno nacional inició un programa intensivo de construcción de obras hidráulicas para la mitigación y prevención de flujos torrenciales. Al presente se han construido 35 presas para estabilización de cauces y retención de sedimentos, distribuidas entre 18 quebradas o cauces torrenciales. Algunas de estas presas son abiertas, del tipo ranurada o con ventanas, y otras son cerradas. La mayoría ha sido construida con gaviones, pero se encuentran también presas de concreto armado, concreto ciclópeo, y presas con elementos tubulares de acero. La existencia de diferentes tipos de estructuras y diferentes materiales en cuencas vecinas con características geomorfológicas similares, ofrece una oportunidad única para evaluar y comparar su comportamiento y desempeño hidráulico. En este trabajo se describen las características de las presas de control de sedimentos construidas en el Estado Vargas después de los deslaves de 1999 y se discute su comportamiento hidráulico después de estar sometidas al paso de las crecientes extraordinarias del año 2005. El objetivo fundamental es evaluar el funcionamiento hidráulico de las presas basándose en

observaciones de campo y levantamiento de información topográfica, hidrológica y sedimentológica.

ÁREA DE ESTUDIO

La región norte costera de Venezuela se encuentra adyacente al Mar Caribe y esta compuesta por una región montañosa (Serranía del Litoral) que se extiende paralela a la línea del mar alcanzando alturas máximas cercanas a los 2800 m. La distancia entre los picos de las montañas y la línea de costa oscila entre 6 a 10 km. Entre la montaña y el mar, en una franja estrecha de tierra cuyo ancho varía entre 200 y 2000 m, han tenido lugar desarrollos urbanísticos y recreacionales que conforman el Estado Vargas, con una población cercana a las 300.000 personas (Figura 1). Las áreas más pobladas se han asentado sobre las gargantas y conos de deyección de las quebradas o torrentes, así como también sobre las laderas y pendientes de la montaña. La mayoría de estos cauces son efímeros, mostrando caudales solamente durante la estación lluviosa entre los meses de Mayo y Septiembre. El número de cuencas afectadas por los deslaves de 1999 ha sido contabilizado en 24.



Figura 1.- Vista satelital del Área de Estudio (tomada del Google Earth).

OBRAS PARA EL CONTROL DE SEDIMENTOS EN CAUCES TORRENCIALES

Las obras para el control del transporte sólido y del perfil del lecho de los cauces torrenciales, se agrupan en dos tipos: a) las obras de estabilización y b) las obras de retención. Las obras de estabilización tienen como objetivo levantar el fondo del cauce y reducir la erosión de las laderas. Usualmente estas consisten en pequeñas presas escalonadas que se construyen en el cauce principal o cauces tributarios cumpliendo también la función de reducir la pendiente y el transporte sólido. Las obras de retención de sedimentos consisten en presas para capturar y almacenar los arrastres sólidos, las cuales se construyen usualmente en la garganta del torrente o en la salida de sus afluentes principales.

Las presas de retención de sedimentos pueden ser del tipo cerrado o abierto, también llamadas impermeables o permeables, respectivamente. Ambas cumplen la función de reducir la concentración de sedimentos y la descarga pico de las crecientes. Las presas cerradas (impermeables) interceptan la mayor proporción del material arrastrado, excepto las partículas más finas que pasan cuando las crecientes desbordan la presa. Las presas abiertas (permeables) se construyen con aberturas en el cuerpo de la estructura y cumplen el objetivo de seleccionar el material sólido, reteniendo las fracciones más gruesas y dejando pasar las más finas. Las presas abiertas pueden ser del tipo ranurado, cuando la abertura alcanza la cresta (presas ranuradas) o del tipo de ventanas, cuando no la alcanza (presas con ventanas). Estas estructuras pueden mantener intacta su capacidad de almacenamiento por periodos mas largos de tiempo, además de reducir el impacto erosivo sobre los tramos aguas abajo ya que el caudal sólido no es interrumpido bruscamente. Si las aberturas son lo suficientemente grandes, los eventos ordinarios (crecientes anuales) no deberían reducir su capacidad de almacenamiento, dejándola disponible para eventos extraordinarios.

PRESAS DE CONTROL DE SEDIMENTOS EN EL ESTADO VARGAS

Se ha hecho un inventario de las presas construidas en el Estado Vargas y se han establecido sus principales características, las cuales se muestran en la Tabla 1. De las 35 presas construidas a partir del año 2000, y de acuerdo a la función que cumplen, se encuentra que 23 de ellas son presas cerradas y 12 son presas abiertas. De acuerdo al tipo de material, cinco (5) de las presas son de concreto y el resto (28) han sido construidas en engavionado. La altura de las presas varía entre un mínimo de 4 m y un máximo de 11 m.

Tabla 1.- Características principales de las presas para control de aludes torrenciales en el Estado Vargas.

Cauce	Número de Presas	Cerradas	Abiertas	Tipo de Material
Tacagua	3	1	2	Acero (2), Gavión (1)
El Piache	1	1	0	Gavión
Mamo	2	2	0	Gavión
Curucuti	4	3	1	Gavión (3), Concreto (1)
Piedra Azul	3	2	1	Gavión (3)
Dos Comadres	2	0	2	Gavión (2)
Osorio	2	2	0	Gavión (2)
Guanape	1	0	1	Concreto
Alcantarilla	2	2	0	Gavión (2)
San Jose de Galipan	1	1	0	Gavión
El Cojo	2	1	1	Gavión (2)
Camuri Chico	1	0	1	Gavión
San Julián	3	0	3	Concreto (3)
Quebrada Seca	1	1	0	Gavión (2)
Camuri Grande	2	2	0	Gavión (2)
Miquelena	2	2	0	Gavión (2)
Anare	2	2	0	Gavión (2)
La Zorra	1	1	0	Gavión

LA TORMENTA DE FEBRERO DEL 2005

En Febrero del 2005 ocurrió una tormenta extraordinaria en la misma zona afectada por los deslaves de 1999, la cual acumuló aproximadamente un total de 400 mm de lluvia en un periodo de 4 días, comprendidos entre el 7 y el 10/02/05. La estación de Macuto registró la

máxima precipitación diaria, 175 mm el 9/02, alcanzando un total de 432 mm, siendo el valor promedio anual en la zona igual a 520 mm. Una gran cantidad de material sedimentario y restos vegetales fue arrastrado hacia las áreas urbanas asentadas en los abanicos aluviales de los torrentes, bloqueando parcial o totalmente los puentes, relleno los cauces y produciendo desbordes e inundaciones de agua y sedimentos. Sin embargo, los daños fueron minimizados en las zonas donde se habían construido las presas de control de sedimentos. Observaciones de campo hechas posteriormente a este evento indicaron que aproximadamente el 50% de las presas estaban totalmente sedimentadas, haciéndose notar que debido a la alta capacidad de producción de sedimentos de las cuencas, algunas de las presas cerradas ya se estaban sedimentando con gran rapidez previo a la creciente de Febrero de 2005 (López, et al., 2006). Un análisis de frecuencia para los valores diarios máximos anuales indicó que el periodo de retorno de la lluvia estuvo en el orden de 100 años.

INVESTIGACIÓN DE CAMPO

Se ha hecho un trabajo de campo a los fines de recabar información para investigar el funcionamiento de las presas construidas en el Estado Vargas. Con este fin, durante el mes de Abril del 2007 se realizaron levantamientos topográficos y muestreos de los sedimentos del lecho en los tramos aguas arriba de las presas construidas en las cuencas de las quebradas Curucutí, Piedra Azul, Alcantarilla, San José de Galipan, y El Cojo. La Figura 2 presenta una vista aérea de algunas de las presas construidas en las quebradas Piedra Azul y Curucutí. Las características principales de las cuencas hidrográficas y de las presas de control de sedimentos se presentan en las Tablas 2 y 3. Las presas fueron construidas durante los años 2002 y 2003 con alturas variando entre 4 y 7 m. La Tabla 4 presenta las características generales de los tramos del cauce donde se construyeron las presas. Las pendientes se encuentran entre 4,5% y 10,2%, con anchos variando entre 6 m y 15 m. Los diámetros máximos observados alcanzan hasta 1,70 m y los diámetros medios están en el rango de las gravas y cantos rodados.



Figura 2.- Vista aérea de algunas de las presas en las quebradas Piedra Azul (izquierda) y Curucutí (derecha).

Tabla 2.- Características principales de las cuencas hidrográficas en estudio

Quebrada	Area (km ²)	Elevación Máxima (msnm)	Longitud total (km)	Pendiente promedio (%)	Q ₅ (m ³ /s)	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)
Curucutí	10	1330	7,1	18,7	34	123	159
Piedra Azul	24,8	1950	9	21,6	82	321	413
Alcantarilla	1,5	1050	3,6	29,0	8	27	34
San José de Galipan	14	2300	8	28,0	76	254	320
El Cojo	6,8	1550	5,5	28,2	21	88	114

Tabla 3.- Dimensiones y características de las presas construidas para el control de sedimentos.

Quebrada	Presa N°	Tipo	Material de construcción	Altura (m)	Ancho (m)	Fecha de terminación
Curucutí	1	Cerrada	Gavión	5	52	Nov. 2002
	2	Cerrada	Gavión	7	54	Abril 2002
	3	Abierta	Concreto	5	57	Abril 2002
	4	Cerrada	Gavión	5	57	Nov. 2002
Piedra Azul	1	Cerrada	Gavión	5	65	Junio 2003
	2	Cerrada	Gavión	4	77	Julio 2002
	3	Abierta	Gavión	4	78	Julio 2002
Alcantarilla	1	Cerrada	Gavión	4	34	Sept. 2002
	2	Cerrada	Gavión	4	29	Sept. 2002
San José de Galipan	1	Cerrada	Gavión	7	76	Marzo 2003
El Cojo	1	Cerrada	Gavión	4	36	Nov. 2002
	2	Abierta	Gavión	4	45	Nov. 2002

Tabla 4.- Características de los tramos del cauce donde se construyeron las presas (B es el ancho promedio del cauce, So es la pendiente promedio, D_m es el diámetro medio del sedimento del lecho y D_{max} es el diámetro máximo).

Quebrada	B (m)	So (%)	D _m (cm)	D _{max} (cm)
Curucutí	10	9,3	18	70
Piedra Azul	15	6,5	10	150
Alcantarilla	6	10,2	4	60
San José de Galipan	15	4,5	9	100
El Cojo	10	9,1	35	170

Los porcentajes de tamaños de los depósitos de sedimentos acumulados aguas arriba de las presas se indican en la Tabla 5. Curvas granulométricas del material del lecho en los sitios de estudio se presentan en la Figura 3. Dado el notable rango en los tamaños de las partículas, se usaron dos métodos diferentes para obtener la distribución granulométrica. Las fracciones finas (arenas y gravas) fueron muestreadas y analizadas por separación mecánica mediante tamizado. Las fracciones mas gruesas fueron analizadas mediante el método de contabilidad aleatoria de Wolman.

Tabla 5.- Distribución de tamaños de los depósitos sedimentarios acumulados en las presas.

Quebrada	Presa N°	% de finos	% de arenas	% de gravas	% cantos rodados	% de peñones	D _m (cm)	D _{max} (cm)
Curucutí	1	1	10	84	5	0	1,59	10
	2	1	14	55	20	10	5,96	30
	3	1	4	25	40	30	18,10	70
Piedra Azul	1	1	15	54	24	6	5,22	25
	2	1	10	57	30	2	5,02	28
	3	1	15	49	25	10	9,96	150
Alcantarilla	1	1	32	52	14	1	2,67	30
	2	1	59	25	10	5	3,54	60
S. J. de Galipán	1	1	40	9	35	15	12,19	100
El Cojo	1	0,3	4,7	5	68	22	19,62	95
	2	0,5	2,5	7	45	45	35,53	170

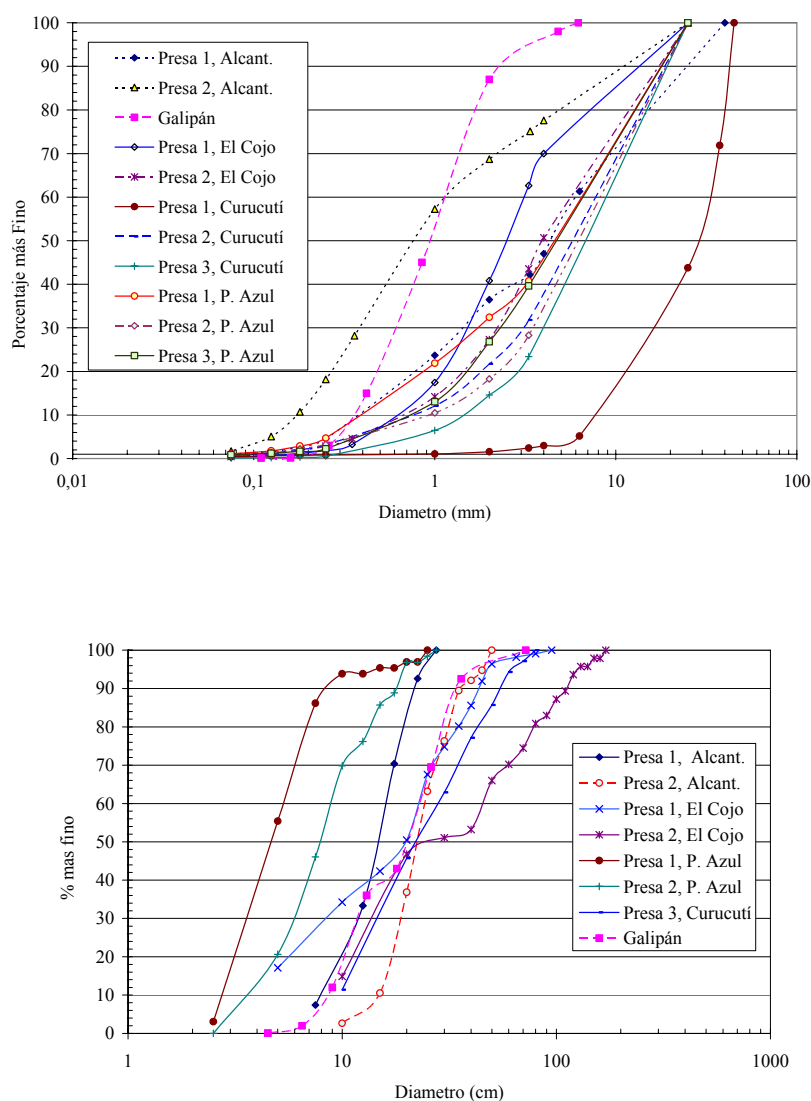


Figura 3.- Curvas granulométricas del material sedimentario (fracciones mas finas en el grafico superior y fracciones más gruesas en el gráfico inferior).

Perfiles de sedimentación de las presas cerradas

La Figura 4 muestra los perfiles longitudinales del lecho del cauce de la Quebrada Curucutí donde se han construido cuatro (4) presas, indicándose el perfil levantado en Abril del 2007 y el perfil inicial, obtenido de restitutiones aerofotogramétricas realizadas antes de la construcción de las presas. Las Presas #1, #2 y #4, son presas cerradas de engavionado, construidas el año 2002 con alturas de 5, 7 y 5 metros de altura, respectivamente, estando completamente sedimentadas para el momento del levantamiento topográfico (04/07). Estas obras consisten usualmente de un dique y un contradique, ubicado a corta distancia aguas abajo para proteger el cuerpo principal de la presa (ver Figura 2). La Presa # 3 es una presa abierta (ranurada) de concreto ciclópeo de 5 m de altura, que se encuentra parcialmente sedimentada. No se observaron daños significativos en estas cuatro estructuras con el paso de la creciente centenaria del 2005. El perfil de sedimentación de la Presa # 1 se extiende hasta casi alcanzar el contradique de la Presa # 2, ubicada a 160 m aguas arriba. Una marcada erosión del lecho y márgenes se observó en el tramo de cauce entre las presas # 3 y # 4, causado posiblemente por la retención de sedimentos de la presa #4 y la gran distancia existente entre ellas (Figura 4).

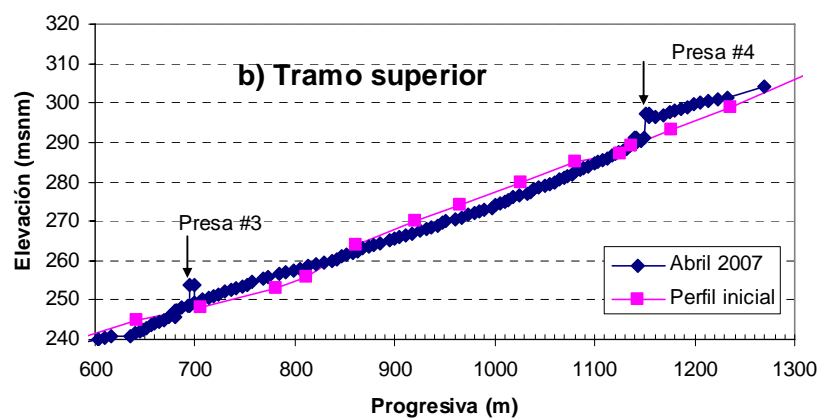
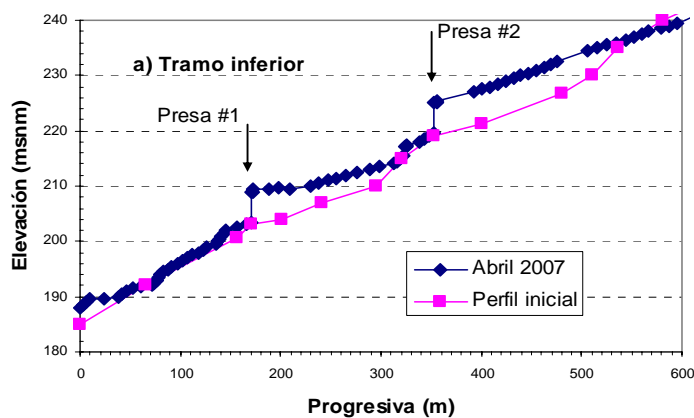


Figura 4.- Perfiles del lecho del cauce de la Quebrada Curucutí y vista de la Presa # 4 totalmente sedimentada.

La Figura 5 presenta el perfil del lecho de la Quebrada Piedra Azul antes y después de la construcción de las presas. Las tres presas han sido construidas en gavión, siendo las dos primeras cerradas, de alturas igual a 5 m y 4 m, y la última abierta, de 5 m de altura. Las Presas # 1 y # 2 presentan un grado de sedimentación total, mientras que la presa abierta # 3, se ha sedimentado parcialmente. Aguas debajo de la Presa # 2, se ha producido una fuerte erosión del lecho, habiendo este descendido unos 3 m, aproximadamente, lo cual puede atribuirse a la combinación de los procesos de erosión local por efecto del chorro y degradación generalizada debido a la retención de los sedimentos aguas arriba (Figura 6).

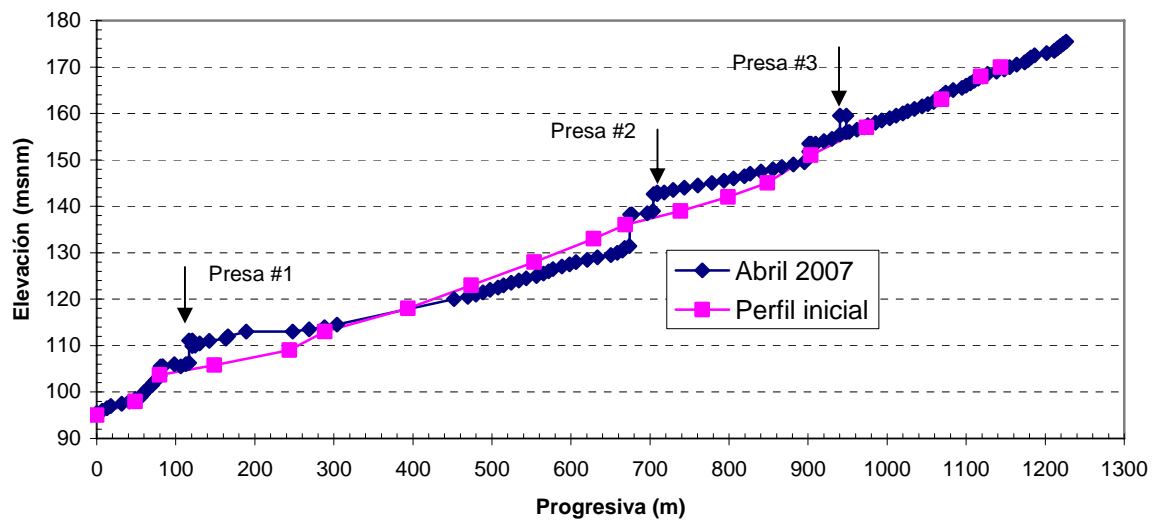


Figura 5.- Perfiles del cauce de la Quebrada Piedra Azul en los tramos aguas arriba de las presas.



Figura 6.- Vista desde aguas abajo de la Presa # 2 en Quebrada Piedra Azul. Foto izquierda tomada en Marzo 2005 y foto derecha en Abril 2007, observándose descenso del lecho de unos 3 m aproximadamente al pié del contradique.

La Figura 7 muestra diferentes perfiles del lecho durante el proceso de sedimentación de la Quebrada San José de Galipán, una presa de gaviones de 7 m de altura construida en la población de Macuto. La construcción de la presa fue culminada en Marzo del 2003 y para Noviembre del 2004 estaba casi totalmente llena de sedimentos a pesar de no haber ocurrido crecientes extraordinarias en ese periodo. El rápido proceso de sedimentación se asocia a la ausencia de ventanas o aberturas en el cuerpo de la presa, que permitan el paso de los flujos normales de agua y sedimentos. La creciente de Febrero del 2005 terminó de rellenar el vaso de la presa con sedimentos gruesos disminuyendo la pendiente de lecho aguas arriba. La pendiente original de 4,5% fue reducida a 2,9% para Marzo de 2005. Los flujos posteriores (crecientes ordinarias) que ocurrieron entre 2005 y 2007 erosionaron los sedimentos finos y abrieron un nuevo cauce, reduciendo ligeramente la pendiente del lecho a un valor de 2,7%, tal como se observa en el perfil levantado en 2007 (Figura 7).

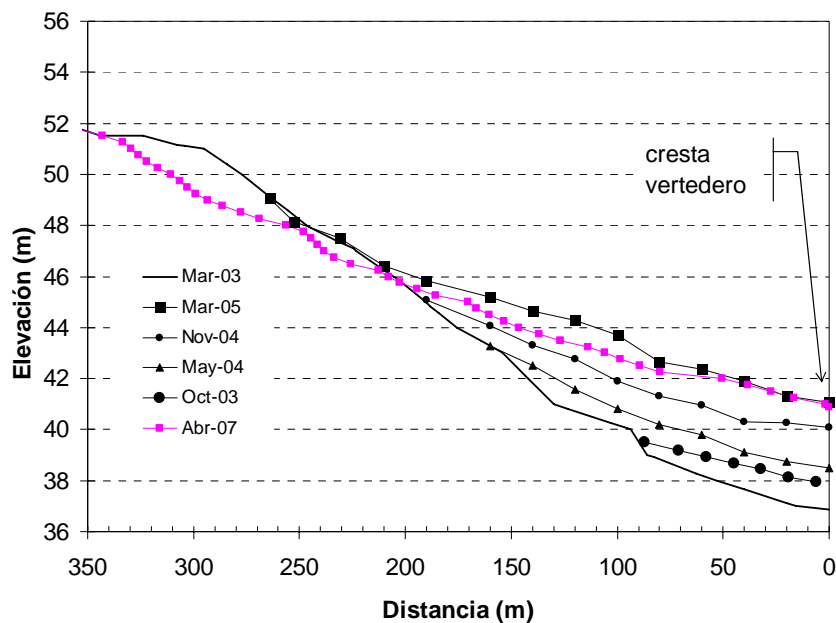


Figura 7.- Cambios temporales en los perfiles del lecho de la Quebrada San José de Galipán aguas arriba de la presa Macuto.

Los volúmenes de sedimentación y las pendientes de equilibrio, también llamadas pendientes de compensación, de las presas cerradas se presentan en la Tabla 6, en donde S_o es la pendiente original del lecho en el tramo inmediatamente aguas arriba del sitio de presa, S_e es la pendiente de equilibrio del lecho para la fecha del trabajo de campo (Abril, 2007), L es la longitud de los depósitos, ΔZ es la profundidad de los depósitos al pie de presa, y Vol es el volumen acumulado del material sedimentario.

Todas las presas cerradas presentan acumulaciones de sedimentos que alcanzan el nivel de la cresta del vertedero. La magnitud de los volúmenes acumulados aguas arriba de las presas oscila entre 2.840 m³ para la presa #2 de la Quebrada Alcantarilla y 34.209 m³ para la presa #2 de la Quebrada Curucutí. Las pendientes de equilibrio varían entre 2,3% y 6,4%. En la Tabla se indica también el valor de la pendiente de equilibrio calculado por la relación igual a 2/3 del valor de la pendiente original, S_o , lo cual es una aproximación basada en

observaciones japonesas, de uso común en el diseño de obras de corrección de torrentes. Como se observa en dicha tabla, los valores medidos son inferiores a los valores calculados por la fórmula japonesa, excepto en el caso de la presa de San José de Galipan donde la aproximación es bastante cercana.

Tabla 6.- Pendientes de equilibrio y volúmenes de sedimentación de las presas cerradas.

Quebrada	Presa N°	So (%)	Se (%)	2/3 So (%)	L (m)	ΔZ (m)	Vol (m ³)
Curucutí	1	8,66	3,57	5,77	148	5	19.240
	2	9,55	5,87	6,37	181	7	34.209
	4	10,57	6,4	7,05	116	5	16.530
Piedra Azul	1	5,89	2,3	3,93	174	5	28.275
	2	6,3	3,67	4,20	186	4	28.644
Alcantarilla	1	9,16	4	6,11	95	4	4.830
	2	10,87	3,36	7,25	62	4	2.840
S.J. Galipan	1	4,45	2,72	2,97	203	4	31.600
El Cojo	1	9,09	3,9	6,06	65	4	4.712

Observaciones sobre las Presas Abiertas

Diferentes tipos de presas abiertas han sido construidas en las quebradas de Estado Vargas. La Tabla 7 presenta las características de las aberturas de algunas de estas estructuras. La presa de Camurí Chico es una presa en engavionado de 6 m de altura, culminada en Agosto del año 2003, provista de 7 ventanas de 4 m de altura por 1 m de ancho, y una abertura central con un ancho de 4 m. Las fotos de la Figura 8 muestran el comportamiento de la presa y los efectos de la creciente del 2005. Los flujos torrenciales movilizaron una gran cantidad de cantos y peñones que se acumularon en las ventanas laterales, bloqueando parcialmente algunas de las mismas. Se observa una acumulación de casi 3 m de altura de sedimentos gruesos en las ventanas laterales, la cual disminuye en dirección hacia la abertura central donde el material fue activamente removido, apreciándose ciertos daños del engavionado en este sector.

Tabla 7.- Características geométricas de las aberturas (ranuras) en las presas abiertas.

Quebrada	Presa N°	Tipo	Número de aberturas	b (m)	h (m)
Camuri Chico	1	ventana	7	1,0	4,0
Curucutí	3	ranurada	5	1,0	7,0
Piedra Azul	3	ranurada	8	1,70	2,0
				2,70	2,0
El Cojo	2	ranurada	9	0,70	1,0
				1,00	1,0
				1,70	1,0



Figura 8. Vista desde aguas arriba de la acumulación de sedimentos en las ventanas de la Quebrada Camuri Chico.

Dos presas de gaviones fueron construidas en el cañón de la Quebrada El Cojo durante el año 2002. La primera es una presa cerrada de 4 m de altura que fue colmatada totalmente por los sedimentos transportados por la creciente del 2005. La segunda presa, construida a unos 100 m aguas arriba, es una estructura abierta de 4 m de altura con ranuras cuyo ancho varía de 0,7 m en el fondo a 1,0 m en el centro, y a 1,7 m en el tope de la misma. El gráfico de la Figura 9 muestra el perfil del fondo actual del cauce para Abril de 2007. El cauce aguas abajo de la presa abierta fue también sujeto a una marcada sedimentación, estimada aproximadamente en 2 m, tal como se observa en la comparación de la foto del año 2002, tomada justo después de la construcción de la presa, con la del año 2005 (ver Figuras 9 y 10). Esto parece haber sido causado por el efecto de remanso de la presa cerrada ubicada a corta distancia aguas abajo.

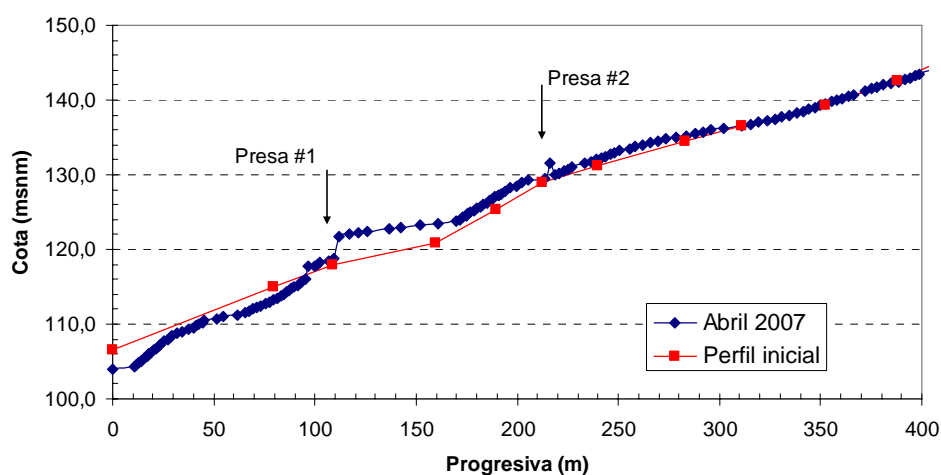


Figura 9. Perfil longitudinal del cauce de la Quebrada El Cojo



Figura 10. Vista desde aguas abajo de la Presa #2 en Quebrada El Cojo. Foto tomada el año 2002 (izquierda) y 2005 (derecha).

La presa abierta también mostraba un alto grado de sedimentación aguas arriba, debido a la obstrucción de las ranuras por peñones, ramas y troncos de árboles, lo cual se ilustra en las fotos de la Figura 11. El material depositado se observa uniformemente distribuido a la ancho de la presa. Peñones de hasta 1,5 m de tamaño se observaron en los tramos superiores del cauce. Algunos daños fueron observados en el recubrimiento de concreto de las ranuras debido a las altas velocidades que debieron producirse en las mismas, las cuales causaron la abrasión del concreto por el flujo de partículas de sedimentos gruesos.



Figura 11. Vista del vaso sedimentado de la Presa #2 en Quebrada El Cojo (izquierda) y de la obstrucción de las ranuras numeradas 7, 8 y 9 (derecha). Fotos tomadas en Febrero del 2005, unos pocos días después de las lluvias torrenciales.

Sin embargo, las crecientes ordinarias que se produjeron posteriormente, entre el año 2005 y el 2007, fueron capaces de erosionar y remover parte de material acumulado en algunas de las ranuras. La Figura 12 muestra una vista cercana de la ranura #8 en fotografías tomadas en Marzo del 2005 y en Abril del 2007. La altura de los sedimentos acumulados a la entrada de la ranura se redujo de 2,5 m a 0,50 m, aproximadamente. Los flujos menores fueron capaces de abrir un nuevo cauce aguas arriba, mediante un proceso de erosión del material fino depositado en el vaso de la presa, tal como se aprecia en la Figura 13.



Figura 12. Vista frontal de la ranura #8 en la Presa #2 de la Quebrada El Cojo, mostrando la obstrucción para el año 2005 y para el año 2007.

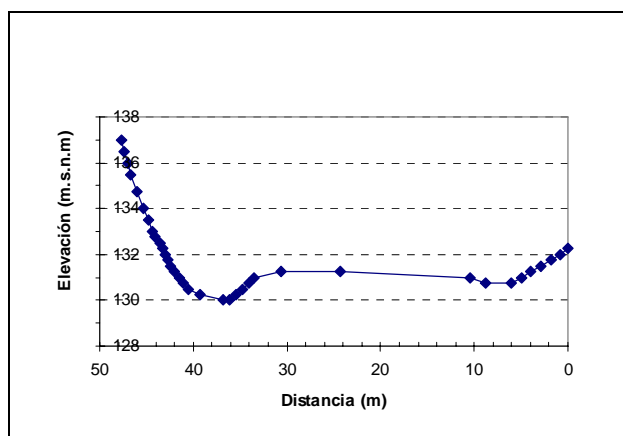


Figura 13. Vista del cauce principal generado hacia aguas arriba de la ranura #8 en la Presa #2 de la Quebrada El Cojo (izquierda) y sección transversal (mirando aguas arriba) levantada en el vaso de la presa a $L = 2$ m (Abril del 2007).

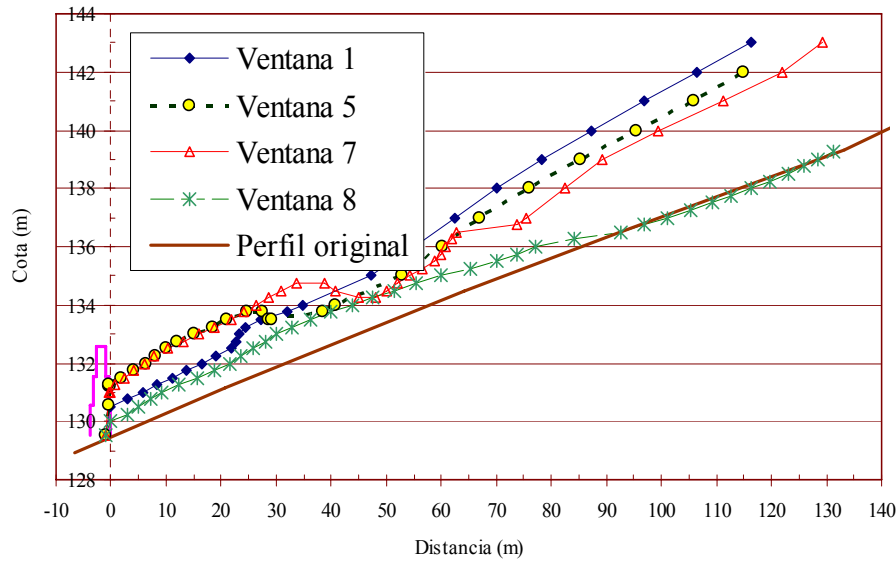


Figura 14. Perfiles longitudinales a lo largo de algunas de las ventanas de la Presa #2 en la Quebrada El Cojo.

La Figura 14 presenta perfiles longitudinales de los depósitos sedimentarios acumulados en la Presa #2, trazados a partir de las ventanas # 1, 5, 7 y 8. El cauce principal esta representado por el perfil de la ventana #8 mientras que un subcauce o cauce secundario fue desarrollado aguas arriba de la ventana #1. Acumulaciones de sedimentos de 2 m de altura se observan en las ventanas #5 y #7, formando barras de material grueso. Igualmente se aprecia una especie de selección o arreglo (sorting) del material sedimentario en la dirección transversal. Los cantos y peñones más grandes se agrupan en el cauce principal mientras que sedimentos finos se observan mezclados con material grueso hacia los lados del canal. Esto se explica por que durante el proceso de apertura del cauce principal, los pequeños caudales comenzaron a arrastrar el material fino produciéndose en consecuencia el engrosamiento del material del lecho.

ESTIMACIÓN DE LA PENDIENTE DE EQUILIBRIO

Una estimación analítica de la pendiente de equilibrio aguas arriba de las presas se hace utilizando el modelo propuesto por Mora, Aguirre, Moncada y Flórez (1992). El modelo se basa en la condición de estado crítico en flujos macrorugosos a partir del criterio de la velocidad crítica.

La velocidad de iniciación del movimiento para flujos macrorugosos en cauces naturales se calcula a partir de la expresión (Aguirre et al, 1990):

$$V_c = \left\{ 1.65 + 0.70 \ln \left(\frac{R}{D} \right) + 0.60 \frac{D}{R} \right\} * K_1 \quad (1)$$

siendo

$$K_1 = \sqrt{g\Delta D \cos \theta (\tan g\phi - \tan g\theta)} \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

donde: R es el radio hidráulico (m), D es el diámetro característico de la partícula de sedimento (m), θ es el ángulo de la pendiente del cauce (radianes), $\theta = \arcsen(S)$, S es la pendiente, g es la aceleración de la gravedad, y ϕ es el ángulo de fricción interna (radianes), γ_s y γ son los pesos específicos del sedimento y del agua, respectivamente.

La ecuación de resistencia utiliza la siguiente expresión para la velocidad media V:

$$V = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{R}{\alpha D} \right) + B_1 - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \frac{\beta D}{R} \right] \sqrt{gRS} \quad (3)$$

donde B_1 es la función aditiva en la distribución de velocidades semilogarítmicas, α es el factor de textura relacionado con el valor normalizado de Nikuradse, β es el coeficiente de estela y κ es la Constante de Von Karman. Los autores expresan que estos parámetros fueron obtenidos mediante calibración con datos de las quebradas La Virgen y Aguas Lindas, en el Estado Mérida. En este trabajo, como una primera aproximación se usan los valores obtenidos por los mencionados autores: $\alpha = 7,1$; $\beta = 0,3$; $B_1 = 8,5$; $\kappa = 0,4$.

La tercera ecuación es la relación de ancho estable propuesta por Glushkov según refiere Mora et al., (1996) basada en la teoría de régimen, la cual relaciona el ancho y la profundidad mediante la ecuación:

$$B^m = ky \quad (4)$$

donde B es el ancho de la superficie libre del flujo (m), y es la profundidad media (m), k es el coeficiente de forma con valores entre 8 y 12 para canales aluviales. Se recomienda como valor medio 10. Para el caso de ríos poco erosionables se sugiere un valor entre 3 y 4, y para aquellos con márgenes erosionables un valor entre 16 y 20.

El valor del exponente m se obtiene mediante la expresión:

$$m = 0,72 \left(\frac{\Delta D}{yS} \right)^{0,1} \quad (5)$$

donde D es el diámetro medio de material de fondo, y S es la pendiente de equilibrio.

Conocidas la profundidad de flujo, la pendiente original, y la granulometría y características del material del lecho (D , γ_s), el procedimiento de cálculo consiste en resolver iterativamente las ecuaciones (1), (3) y (4) para encontrar las incógnitas V, R y S_e siendo esta última la pendiente de equilibrio, hasta satisfacer un caudal preestablecido de antemano. El modelo

supone que la pendiente (S_e) se produce para la condición de movimiento incipiente (no erosión) en donde la velocidad del flujo se hace igual a la velocidad crítica.

Los resultados se muestran en la Tabla 8. Debido a la incertidumbre relacionada con la selección del caudal formativo de la pendiente de equilibrio, en este trabajo se aplicó el modelo variando el caudal hasta encontrar la pendiente de equilibrio medida en los levantamientos topográficos, dada en la Tabla 6. El caudal así calculado se presenta en la Tabla 8 junto con el periodo de retorno correspondiente. También se incluye el ancho promedio obtenido, la velocidad crítica y la profundidad del flujo. El modelo predice que los caudales que producen las pendientes de equilibrio medidas, presentan periodos de retorno entre 2,3 y 10,7 años.

Tabla 8.- Pendientes de equilibrio calculadas mediante el modelo de movimiento incipiente.

Quebrada	S_0	y (m)	V_c (m/s)	B (m)	S_e calculada	$Q_{\text{calculado}}$ (m³/s)	Tr (años)
Curucutí Presa 1	8,66%	1,11	3,61	15,44	3,57%	62	10,70
Curucutí Presa 2	9,55%	0,79	3,33	10,76	5,87%	28,17	4,68
Curucutí Presa 2	10,57%	0,73	3,25	9,96	6,40%	23,7	4,19
Piedra azul Presa 1	5,89%	0,89	2,97	11,73	2,29%	31	3,39
Piedra azul Presa 2	6,30%	0,63	2,78	8,19	3,67%	14,36	2,91
Alcantarilla presa 1	9,16%	0,22	1,64	2,49	4,00%	0,912	2,33
Alcantarilla presa 2	10,87%	0,25	1,68	2,85	3,36%	1,206	2,41
San José de Galipán	4,50%	0,72	2,80	9,37	2,72%	18,85	2,62

CONCLUSIONES

El presente trabajo representa el inicio de una investigación sobre el funcionamiento de las presas para control de sedimentos y aludes torrenciales, basados en las experiencias del Estado Vargas. Uno de los objetivos es medir y analizar las pendientes de equilibrio que se están formando en los lechos aguas arriba de las presas, a los fines de desarrollar modelos matemáticos para la predicción de las tendencias en la evolución del lecho y los cambios granulométricos. Otro aspecto se centra en la investigación sobre el funcionamiento de las presas abiertas. En esta primera fase se han analizado 13 presas construidas en los cauces de Curucutí, Piedra Azul, Alcantarilla, San José de Galipán, El Cojo y Camurí Chico.

Los resultados de la investigación de campo han permitido determinar los perfiles del lecho y las características de los depósitos sedimentarios acumulados aguas arriba de las presas analizadas. Todas las presas cerradas (14) construidas entre los años 2002 y 2004 están totalmente sedimentadas. El proceso rápido de sedimentación de las presas cerradas esta asociado por una parte a la gran capacidad de producción de sedimentos de las cuencas, y por otra a la falta de ventanas o aberturas en el cuerpo de la presa que permitan el paso de los flujos normales de agua y sedimentos. Las pendientes de equilibrio medidas en campo son inferiores (excepto para la Quebrada San José de Galipán) a los valores calculados por la fórmula tradicional basada en observaciones japonesas, igual a 2/3 del valor de la pendiente original. Las observaciones periódicas hechas aguas arriba de la presa Macuto (Figura 7)

indican que la pendiente de equilibrio varía en el tiempo, disminuyendo con los caudales de las crecientes ordinarias y aumentando con las crecientes extraordinarias.

La retención total de los sedimentos en las presas cerradas ha originado, en algunos casos, procesos erosivos en los tramos aguas abajo debido al efecto del flujo con una capacidad de transporte no saturada. En los cauces en donde se han construido varias presas, el proceso de erosión se manifiesta cuando la distancia entre las presas es muy grande, tal es el caso de la Quebrada Curucuti, entre las presas # 3 y # 4, y la Quebrada Piedra Azul, entre las presas #1 y #2 (ver Figuras 4, 5 y 6).

Las observaciones de campo indican que el funcionamiento de las presas abiertas ha sido satisfactorio. Las aberturas han cumplido la función de dosificar el transporte de sedimentos y retener las fracciones más gruesas. En algunos casos las presas abiertas se han autolimpiado. Los flujos ordinarios que se produjeron posteriormente a la creciente del año 2005, han sido capaces de erosionar y remover parte de material acumulado en algunas de las ranuras de las presas (Figuras 12 y 13), abriendo nuevos cauces aguas arriba mediante el proceso de erosión del material fino depositado en el vaso de la presa. Barras de material grueso se han formado entre las ventanas apreciándose igualmente una especie de selección o arreglo (sorting) del material sedimentario en la dirección transversal.

Se ha aplicado un modelo teórico basado en el uso de tres ecuaciones para flujos macrorugosos (Mora et al, 1996), ecuaciones para el movimiento incipiente, resistencia al flujo y estabilidad, a fin de determinar las pendientes de equilibrio en los cauces analizados. Los resultados indican que los caudales que reproducen la pendiente de equilibrio tienen una recurrencia entre 2 y 10 años.

Agradecimiento. Se agradece al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV), y al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (Fonacit) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

LISTA DE SÍMBOLOS

V _c :	Velocidad crítica
V:	Velocidad del flujo
R:	Radio hidráulico
D:	Diámetro característico de la partícula de sedimento.
θ:	Angulo de la pendiente del lecho
g:	Aceleración de la gravedad
φ:	Angulo de fricción interna.
B ₁ :	Función aditiva en la distribución de velocidades semilogarítmicas
α:	Factor de textura relacionado con el valor normalizado de Nikuradse
β:	Coefficiente de estela
κ:	Constante de Von Karman.
B:	Ancho de la superficie libre del flujo
y:	Profundidad media
k:	Coefficiente de forma
S ₀ :	Pendiente del cauce

Se: pendiente de equilibrio
 ΔZ : profundidad de los depósitos al pié de presa
L: longitud de los depósitos
Vol: volumen acumulado del material sedimentario.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mora J., Aguirre J., Moncada A., y Flórez I. (1996). “Una Expresión Para La Pendiente de Equilibrio en Torrentes de Montaña”, XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador, Octubre, pp.93-103.

Aguirre, J., Fuentes R., y Olivero M.L. (1990). “Fricción y Movimiento Incipiente en Ríos de Montaña”, XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay, pp.1549-1560.

López, J.L., Falcon, M., y Pérez-Hernández, D. (2006) “Effect of the Torrential Flows of December 2005 on Sediment Control Dams in the State of Vargas, Venezuela”, International Symposium on Hydraulic Structures, Puerto Ordaz, Venezuela, 12 al 14 de Octubre.