

OBRAS HIDRÁULICAS EN CUENCAS CON FUERTE PENDIENTE, PARA EL CONTROL DE SEDIMENTOS Y PROTECCIÓN DE POBLACIONES

Javier Osnaya Romero, Amado Abel Jiménez Castañeda, Jesús Gracia Sánchez
Víctor Franco

Instituto de Ingeniería, UNAM, México, Tel 52 55 56 23 36 00 ext 8612, 8621,8630 8691
jor@pumas.iingen.unam.mx, ajc@pumas.iingen.unam.mx,
jgs@pumas.iingen.unam.mx, vfr@pumas.iingen.unam.mx

1. INTRODUCCIÓN

Las partes altas de las cuencas presentan pendientes del terreno muy fuertes y de manera natural existe una acentuada erosión del suelo en esas zonas. Tan esto es cierto, que al final de la parte alta de las cuencas, en la zona denominada piamonte, existen grandes deltas producto del depósito del material sólido transportado por los ríos. Desafortunadamente, es en estos sitios donde se han ubicado los centros poblacionales, por lo que están expuestos a inundaciones debido al movimiento del curso de los ríos en las zonas de depósito. Ahora bien, se ha dicho que existe “de manera natural” una fuerte erosión de la parte alta de las cuencas; esto es cierto, pero también lo es, que existe una deforestación muy acelerada.

Aparte de la obvia necesidad de reforestar las cuencas, en este trabajo se presenta un estudio de gran visión de las obras para controlar la agresividad de las corrientes reduciendo la energía del flujo, reteniendo azolves y disminuyendo la pendiente del fondo del cauce.

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de gran visión de las obras de protección desde el punto de vista hidráulico. Con estos resultados y la justificación estructural y geotécnica, se podrá realizar el estudio de factibilidad técnico - económica.

Este trabajo tiene el alcance de plantear obras solamente en la cuenca. Sin embargo, deberán realizarse obras específicas de protección y reordenamiento urbano, en las poblaciones localizadas a la salida de las cuencas.

2. OBJETIVO DEL TRABAJO

El principal objetivo de este estudio de gran visión, es proponer el número y las dimensiones de las estructuras hidráulicas, para la disminuir la energía del flujo, retener azolves y reducir la pendiente del fondo de los cauces en las cuencas de los ríos Huixtla y Coatán.

Para obtener la información topográfica se emplearon los planos generados a partir de modelos digitales de terreno (LIDAR y Spot 5 ortorectificadas de 2.5 m). Las técnicas empleadas son la estándar para este tipo de estudios.

3. CRITERIO DE DISEÑO DE LAS OBRAS DE PROTECCIÓN

3.1 Antecedentes

Si bien es cierto que existe literatura sobre el tema, ésta no es extensa, ni tampoco ofrece criterios de cálculo estándar. Generalmente sólo presentan fotografías de las diferentes estructuras construidas. Ejemplo de estas referencias las constituyen Ikeya (1976), Tetra Tech, Inc, 2001 y Wright W E, 1999. Uno de los procedimientos de cálculo más coherentes aunque no muy generalizado, lo constituye el de las represas “SABO”. Estas represas han sido abundantemente construidas en el Japón, debido a que su topografía montañosa los ha conducido a tener que proteger sus cuencas contra los constantes transportes de material grueso (debris flow). Otro sitio que presenta una problemática semejante es la región de los Alpes. Fuera de estos dos lugares existen muchos trabajos aislados en el resto del mundo (Chanson, 1994).

3.2 Idealización del fenómeno analizado.

De acuerdo con la revisión bibliográfica revisada se ha utilizado el siguiente criterio para realizar el diseño de las obras de protección, en la cuenca del río Huixtla:

- a) Las cuenca del río Huixtla es una zona de precipitación alta; cuando se presentan condiciones extraordinarias, se producen importantes aportes de sedimento fino y grueso. Éste último a través del fenómeno denominado debris flow, que es el aporte de cantidades importantes de sedimento grueso por el fondo.
- b) Los grandes aportes de sedimento (grueso y fino) se deben especialmente a la deforestación de las cuencas. Esto ha causado el aumento de los escurrimientos y el transporte de material sólido, además de la falla de taludes en las laderas.
- c) El sedimento fino se mueve y sale con la avenida; sin embargo, el material grueso se deposita en los sitios donde existen cambios importantes de la pendiente del cauce. Dado que las poblaciones se encuentran comúnmente en esas partes donde la pendiente disminuye, ahí ocurren los principales desbordamientos.
- d) Durante las avenidas normales existe movimiento del sedimento acorde con los escurrimientos, sin embargo, durante las avenidas extraordinarias, se mueven también cantidades extraordinarias de sedimento grueso (debris flow).

3.3 Hipótesis de funcionamiento de la solución planteada

De acuerdo con la descripción anterior, la propuesta que se hace para disminuir los peligros contra las poblaciones vecinas a los cauces, es la construcción de represas denominadas comúnmente “check dams”, bajo diferentes variantes. De estas variantes, las represas de tipo “SABO” son las más adecuadas para los casos estudiados.

Las represas tipo “SABO” se construyen desde hace más de cien años en Japón (Ikeya, 1976). Ello se debe a que dado lo accidentado de su territorio, la ocurrencia de grandes avenidas con importantes cantidades de sedimento es un fenómeno común en aquel país. En realidad el término “SABO” no se restringe a represas, sino también a

diferentes obras que tienen por objeto el control del agua y el sedimento en los ríos; sin embargo, aquí las técnicas “SABO”, se usará sólo en lo referente a las represas.

Las represas tienen como función principal disminuir la energía del flujo, retener azolves y cambiar la pendiente del fondo del cauce. Con ello se logra tener un flujo menos rápido a la salida de la cuenca para evitar un ataque grave contra las poblaciones. Es importante señalar que este tipo de represas no tienen capacidad para retener azolve, por lo cual en pocos años se pueden llenar, o bien en una sola crecida extraordinaria.

La fig. 1 ilustra bien el tipo de trabajo a realizar. Nótese la ladera de fuerte pendiente (véanse las rocas a punto de rodar); aquí no es posible instalar ningún tipo de obra hidráulica, sólo queda el camino de reforestar, porque aún el terraceo es muy difícil en este tipo de terreno. Obsérvese que en el fondo existe un cauce que recoge todo el material que puede moverse de la ladera. Es en este tipo de cauces donde se intente instalar las represas para controlar los flujos de sedimento y agua.



Figura.1 Ejemplo de cauces dónde se instalarían las represas

3.4 La importancia del control de la erosión de suelos

Si bien en este trabajo no se tratará el control del sedimento fino, es importante señalar la necesidad de realizar trabajos de terraceo y reforestación de las laderas, ya que es el único control verdadero del aporte de sedimento de las cuencas y de los escurrimientos al aumentar la infiltración. Esto se debe a que la vegetación amortigua el impacto de las gotas de lluvia y retiene importantes cantidades de agua.

Además, los sistemas radiculares retienen al suelo y por lo tanto mejora la infiltración disminuyendo en consecuencia los escurrimientos. En las figs. 2 y 3 se muestran dos escenarios de una misma cuenca después de las lluvias de 2005, donde en una prácticamente ya no existe la vegetación natural y en la otra sí. Como se puede observar, la cuenca donde no existe vegetación los daños son evidentes, mientras que en la otra son mínimos.



Figura 2. Con escasa vegetación natural



Figura 3. Con vegetación natural

Finalmente conviene destacar algo muy importante: **sí no se realiza en la cuenca la rehabilitación de las laderas (terraceo y reforestación), las obras de control de sedimento propuestas en las corrientes tendrán una vida útil muy corta. Considérese, que los procesos de reforestación son largos y de no iniciarlos inmediatamente, se incrementará el problema y se retrasará la solución.**

4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTRUCTURAS DE CONTROL

Las estructuras propuestas esencialmente constan de una cortina con un vertedor en la parte central y una estructura disipadora al pie de la cortina. El vertedor es de cresta libre y puede tener la particularidad de estar constituido de dos secciones, una trapezoidal superior que es de cresta muy amplia y otra, inmediatamente abajo de la anterior (también de forma trapezoidal), que tiene un ancho de cresta menor. La hipótesis principal de funcionamiento radica en suponer que el “debris flow” transita por el vertedor más pequeño, en tanto que la corriente principal ocurre por la parte superior. Este es el criterio de las represas tipo “SABO” (Cimarra, 1998).

En la fig. 4 se muestra una perspectiva de la vista general de las represas. En la fig. 5 se muestra una estructura “Tipo” para reducir el transporte de material sólido.

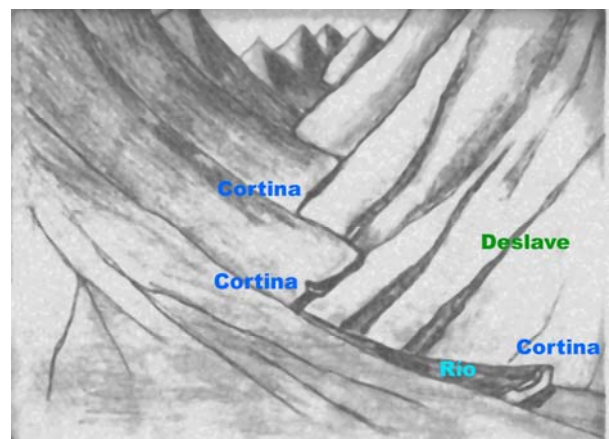


Figura 4. Esquema que muestra la ubicación general de las represas

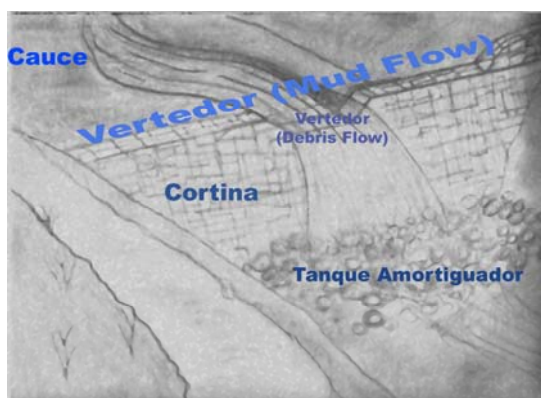


Figura 5. Perspectiva de una represa de control "Tipo"

Obsérvese en la fig. 5 la zona de amortiguamiento al pie de la cortina, los dos vertedores para el flujo de debris flow y agua, y el camino de acceso a la obra. La cortina puede ser de mampostería, concreto, gaviones, rejillas, etc.

El funcionamiento esperado de estas estructuras es el siguiente:

- Con gastos bajos el flujo de agua y sedimento ocurrirá principalmente por el vertedor más bajo.
- Mientras el sedimento no llegue a la cresta del vertedor más bajo, la mayor parte de él se depositará en la represa.
- Con gastos extraordinarios el flujo ocurrirá a lo largo de toda la cresta de vertido (crestas superior e inferior).
- Cuando una represa se llene de sedimento, su efecto será principalmente el de reducir la velocidad del escurrimiento. Esto ocurrirá debido a la disipación de energía aguas abajo de la cortina, y por la disminución de la pendiente longitudinal del tramo del cauce.

En la fig. 6 se muestra una vista del transporte de "debris flow" en un vertedor como el diseñado con las ideas anteriores. Se observa que parte del diseño estructural de la cortina deberá considerar la resistencia para soportar el impacto de un flujo con agua y rocas. Esto mismo se deberá tomar en cuenta en el diseño de los empotramientos.

Existen algunas variantes importantes que dependerán del tipo de cortina seleccionado y de la operación y mantenimiento para cada represa. Por ejemplo, si la represa decide hacerse permeable y se desea retirar regularmente el material depositado, entonces será necesario preparar el acceso de maquinaria y transporte para la limpieza (ver fig. 7).

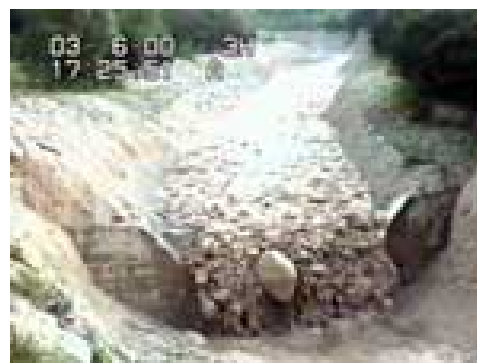


Figura 6. Debris flow



Figura 7. Limpieza de una represa

Es recomendable disponer de topografía con curvas de nivel a cada 2.5 m (mínimo), lo cual se puede lograr con imágenes de tecnología LIDAR, o con imágenes de satélite con resolución equivalente. Por supuesto, el levantamiento directo en campo de las secciones del cauce sería lo más deseable. Con esta información, es posible hacer una preselección de los sitios donde se considera que se pueden construir las represas para retener el material grueso transportado por el flujo. Esta primera selección, se hace tomando en cuenta que hacia aguas arriba del sitio

seleccionado, la pendiente del cauce sea pequeña y se disponga de una superficie de inundación adecuada para la regulación.

Después, se deben hacer visitas técnicas a los sitios preseleccionados, y con ayuda de estudios geológicos y geofísicos, determinar si ese sitio es adecuado, o hay que reubicarlo.

Finalmente, habrá que decidir el material con el que se construirá la cortina, dependiendo de la ubicación de bancos de material y de caminos de acceso al sitio.

5. OBRAS PROPUESTAS PARA LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA

En la fig. 8 se muestra la cuenca del río Huixtla y en ella se indican los sitios donde se han propuesto colocar represas para el control de los escurrimientos y del sedimento.

Aplicando el criterio "SABO" (Cimarra, 1998), se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 1. Con estos resultados y la longitud del cauce se necesitan 79 represas.

En la tabla 1 se presentan las características y dimensiones de algunas de las represas tipo. El diseño se realizó tomando en cuenta la pendiente particular del sitio donde se ubica la represa tipo debido a que es un proyecto de gran visión. Para afinar las dimensiones de las represas intermedias se deberá tomar en cuenta la pendiente de cada sitio en el momento de ubicar cada una en campo.

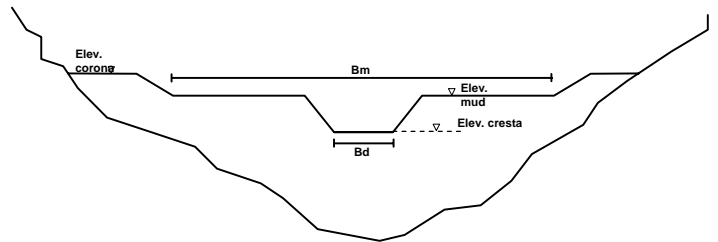
Tabla 1.- Tabla de resultados del diseño

| Nombre | H000 | H001 | H002 | H003 | H007 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| X (UTM) | 562170 | 562882 | 565621 | 569035 | 563787 |
| Y (UTM) | 1677884 | 1680090 | 1689315 | 1693646 | 1679840 |
| Z (UTM) | 126 | 222 | 600 | 844 | 252 |
| Ac (km ²) | 337.40 | 271.05 | 187.25 | 24.06 | 45.58 |
| Lcp (km) | 40.41 | 36.75 | 25.56 | 8.84 | 15.83 |
| Sc (grado) | 3.72 | 3.90 | 4.76 | 10.77 | 8.37 |
| Sd (grado) | 2 | 2 | 1.6 | 2.5 | 1.5 |
| Bd (m) | 60.75 | 27.27 | 45.55 | 16.78 | 22.57 |
| Bm (m) | 149.56 | 67.14 | 112.14 | 41.30 | 55.57 |
| Elv. cresta | 134 | 230 | 608 | 852 | 260 |

| | | | | | |
|-------------------------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Elv. mud | 137.30 | 234.32 | 610.89 | 853.56 | 262.04 |
| Elv. corona | 138.26 | 235.86 | 611.81 | 853.86 | 262.56 |
| Tp (h) | 25.97 | 25.80 | 25.26 | 24.41 | 24.70 |
| Qp (m ³ /s) | 1398.05 | 1126.77 | 785.90 | 106.62 | 193.01 |
| Anec (m ²) | 144.96 | 104.96 | 103.10 | 12.56 | 29.19 |
| Qsp (m ³ /s) | 230.68 | 185.92 | 129.67 | 17.59 | 31.85 |

Nomenclatura:

| | |
|-----------|---|
| X, Y | Coordenadas UTM |
| Z | Elevación del terreno |
| Ac. | Área de la cuenca |
| Lcp | Longitud del cauce principal |
| Sc | Pendiente de la cuenca |
| Sd | Nueva pendiente del cauce |
| Bd | Ancho de la base del vertedor para el debris flow |
| Bm | Ancho de la base del vertedor para el mud flow |
| Tp | Tiempo pico |
| Qp | Gasto pico |
| B corona | Ancho de la corona de la cortina |
| B base | Ancho de la base de la cortina |
| A tot cor | Área de la sección transversal de la cortina |



En el sitio H000 indicado en la fig 8, el gasto asociado a un periodo de retorno de 100 años es de 1398 m³/s, el cual es producido por una lluvia en exceso de 325 mm en 24 h, en una cuenca con área de 337.4 km².

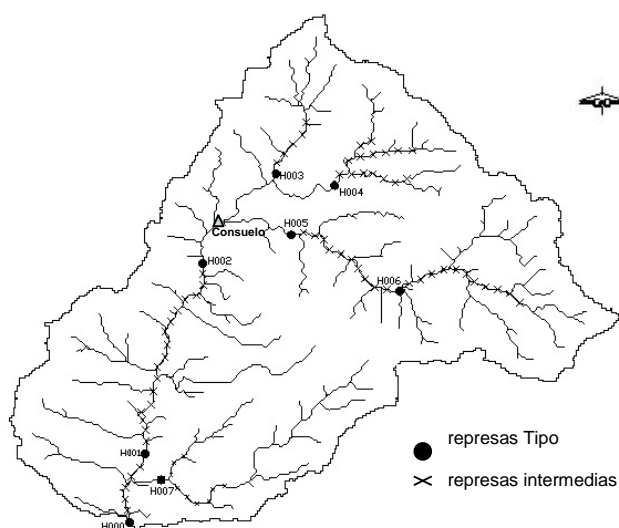


Figura 8. Localización de las represas en la cuenca del río Huixtla

En el diseño propuesto se contempla la posibilidad de construir más represas en el mediano plazo (p.e. 10 años), ello dependerá del comportamiento de las obras propuestas en esta versión. Es decir, según el grado de colmatación de sedimento, se decidirá la construcción de represas intermedias en el futuro.

Dado que aún 79 represas pudieran ser demasiadas, desde el punto de vista económico, se debe contemplar la posibilidad de construir solamente algunas (probablemente 10), aguas arriba de la ciudad de Huixtla, y en general de las poblaciones. La justificación técnica de esto se debe a que 10 represas (p.e.) se colmatarán rápidamente y pronto dejarán de servir para los fines de retención, en tanto que 79 le darán una vida más larga a toda la obra. Es obvio que lo deseable sería construirlas todas, sin embargo debido al costo y problemas de inundación de zonas pobladas, como por ejemplo la población “Consuelo”. El construir las diez primeras a la salida de la cuenca protegerá a corto plazo a la población de Huixtla y para la población de Consuelo se podrán construir 5 antes de la llegada a esta población.

Evidentemente será necesario realizar el acoplamiento de la estructura más cercana a la ciudad de Huixtla para tener una protección integral. Por otro lado se ha cuidado que la población de Consuelo que se encuentra en la parte media de la cuenca no sea afectada por las obras propuestas.

En la fig 9 se muestra el ejemplo de una parte de los planos empleados, correspondiente al río Huixtla. Obsérvese el detalle batimétrico para la ubicación y determinación de las principales dimensiones de las estructuras. Pero es evidente que estos sitios deberán ser verificados en campo y es posible que existan diferencias importantes. Nótese que la tecnología empleada en los levantamientos es nueva y deberá ser contrastada con las mediciones en campo, para definir su verdadero alcance.

La nueva metodología empleada en los levantamientos (LIDAR e imágenes de satélite) no son técnicas ampliamente empleadas en este tipo de trabajos que requieren una alta precisión, y es posible que requiera de ajustes. Sobre todo en las cuencas consideradas donde la variación de niveles va desde los 3000 msnm hasta los 200 msnm en unos cuantos kilómetros. Esto evidentemente repercute en la precisión obtenida con los métodos de medición. Sin embargo, nótese que en una zona tan abrupta es muy difícil tener una buena aproximación sobre todo en la vertical.

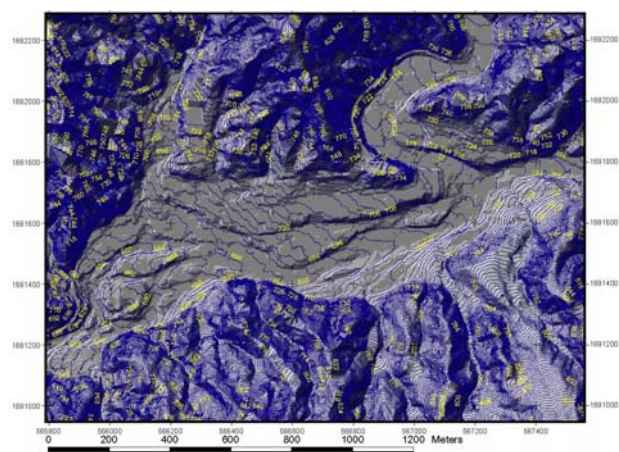


Figura 9 Detalle del cauce para la ubicación de las obras propuestas en la cuenca del río Huixtla

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Este trabajo corresponde a un estudio de gran visión realizado para la parte alta de la cuenca del río Huixtla, donde se han propuesto las obras necesarias para disminuir

la energía del escurrimiento que proviene de las partes altas, y reducir el transporte del material grueso que incide directamente sobre las poblaciones ubicadas aguas abajo. Esto se logra instalando una serie de represas a lo largo de los cauces principales, que cambian la pendiente del fondo al retener parte del sedimento grueso y por lo tanto disminuyen la velocidad, además también mediante estructuras en la descarga, se disipa la energía del flujo.

En la Cuenca del río Huixtla se propone instalar 79 represas de 8.0 m de altura cada una. El volumen total aproximado de mampostería calculado es de 260,000 m³.

El volumen reportado de mampostería sirve sólo como referencia, pues el tipo de material de construcción de las represas, puede ser muy variado, tal como concreto armado, concreto rodillado, gaviones, rejillas, etc. Esto también dependerá de los aspectos geotécnicos de las boquillas. Por esta razón, los reconocimientos de campo podrían cambiar la ubicación de los sitios aquí propuestos.

Respecto al empotramiento de las cortinas, debe notarse que éste deberá ser suficientemente seguro, para resistir el empuje de la masa de agua y rocas, sobretodo cuando se tratara de una cortina de concreto.

Las estructuras disipadores en la descarga de los vertedores, son una parte fundamental de la seguridad de las represas. En este caso se proponen tapetes de disipación (corazas) construidas a partir del material más grueso del mismo cauce, en dos capas con elementos no menores de 1.00 m de diámetro medio, con longitudes del orden de 15 m.

Conviene aclarar que las represas propuestas, no son reguladoras, pues su capacidad de almacenamiento es despreciable. Esto es consecuencia de que los cauces son estrechos y con fuerte pendiente.

El resultado obtenido indica la necesidad de construir un número grande de represas, que por lo mismo probablemente serán costosas; por ello, una alternativa podría ser la de proteger solamente el tramo del cauce de llegada a los centros urbanos, con lo cual disminuiría notablemente el volumen de obra. Sin embargo esto

repercutiría en que la vida útil del sistema sería mucho menor, por lo que a largo plazo de todos modos será necesario construir más, aunque ello dependerá de la reforestación alcanzada. Es evidente que durante este período, daría tiempo a realizar mejores obras de protección a los cauces dentro de las ciudades.

Debido a que el aporte de sedimento se reduciría drásticamente durante el llenado de las represas, esto provocará erosión de los cauces aguas abajo de la represa más cercana a la ciudad, lo cual permitiría la implementación de obras.

8.2 Recomendaciones

Será conveniente revisar las posibles alternativas de construcción de las obras propuestas, ya que dependiendo del material de construcción, las características geotécnicas de cada sitio y la disponibilidad de caminos de acceso, se deberá obtener la mejor alternativa técnico - económica en cada caso.

De ser construidas las represas, requerirán de ser revisadas periódicamente (p.e después de cada época de avenidas), para determinar las tasas de sedimentación observadas y el estado físico de las cortinas y los tapetes de disipación. Adicionalmente, esto servirá para planear la construcción de las represas intermedias.

Será conveniente considerar el acceso a los sitios de construcción, ya que es obvio que abrir nuevos caminos por la montaña, traerá como consecuencia que se induzca la invasión humana de las cuencas y se genere más erosión.

Si bien en este trabajo no se trató el control forestal (terraceo y reforestación) es importante señalar la necesidad de realizar esos trabajos en las laderas, porque es el único control verdadero del aporte de sedimento de las cuencas y del flujo de agua. De no realizarse la rehabilitación de las laderas de las cuencas, las obras de control de sedimento propuestas (represas) en las corrientes tendrán una vida útil muy corta.

BIBLIOGRAFÍA

Camargo, H y Franco. V. (2001), Manual de Gaviones, Serie Azul, No. 624, Instituto de Ingeniería, UNAM

Chanson, H. (1999), The Hydraulics of Open Channel Flow, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam

Chanson, H. (1994), Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways, Pergamon, Great Britain

Cimarra M. O. (1998), Dam stability on lahar, Final report in individual study for the group training course in volcanology and volcanic "SABO" engineering, JICA

Hallmark, D. E. (1978), Presas pequeñas de concreto, Ed, Limusa

Heitmuller T F, Asquith H W, Fang X, Thompson

B D, Wang H K (2005), Literature Review for Texas Department of Transportation Research Project 0-4695: Guidance for Design in Areas of Extreme Bed-Load Mobility, Edwards Plateau, Texas, U.S.

Geological Survey Open-File Report 2005-1234

Holý, M. (1980), Erosion and environment, Pergamon Press, Great Britain

Ikeya, H. (1976), Introduction to sabō works, The Japan Sabō Association, Tokyo, Japan

Kinori, B. Z. (1970), Manual of surface drainage engineering, Elsevier Publishing Co, Amsterdam Netherlands

Maza, A. J. A. (1990), Introduction to river engineering, Univeritá Italiana per Stranieri Advanced course on Water Resources Management, Perugia Italia.

Maza, A. J. A. (1997) Obras de Protección para Control de Inundaciones, Cap. 15, Manual de Ingeniería de Ríos, Serie Azul, No. 591, Instituto de Ingeniería, UNAM

Merrick 2006. Página Web consultada en Julio, 2006
http://www.merrick.com/servicelines/gis/espanol/lidar.a_spx

Tetra Tech, Inc (2001), Report for blackwood creek tmdl feasibility project lake Tahoe, California, The California State Water Quality Control Board and Lahontan Regional Water Quality Control Board Wright Water Engineers Inc and Denver Regional Council of Governments (1999), Mountain driveway best management practices manual, The Colorado Nonpoint Source Council