

# CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN

NÚMERO

# 49

noviembre, 1999

OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES

Marco Antonio Salas Salinas

APRED  
30

(3552)  
No. 8

SISTEMA NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES  
MÉXICO

1a. edición, noviembre 1999

© SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN  
© CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES  
Av. Delfín Madrigal No. 665,  
Col. Pedregal Santo Domingo,  
Deleg. Coyoacán, C.P. 04360, México, D.F.  
Teléfono: 424-6100  
Fax: 606-1608

© Autor: Marco A. Salas Salinas

Derechos reservados conforme a la ley  
IMPRESO EN MEXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional:  
Coordinación de Difusión  
Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES  
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL AUTOR

## SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

**Lic. Diódoro Carrasco Altamirano**  
Secretario de Gobernación

**Lic. José Luis Alcudía García**  
Coordinador General de Protección Civil

## CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

**Dr. Roberto Meli**  
Director General

**Dr. Servando de la Cruz Reyna**  
Coordinador de Investigación

**M. en I. Roberto Quaas**  
Coordinador de Instrumentación

**Lic. Ricardo Cícero Betancourt**  
Coordinador de Difusión



**SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA  
INUNDACIONES**

Marco A. Salas Salinas

**COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN  
ÁREA DE RIESGOS HIDROMETEOROLÓGICOS**

Noviembre, 1999

# CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN

## PRESENTACIÓN

La Coordinación de Investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) realiza estudios sobre las características de los fenómenos naturales y de las actividades humanas que son fuentes potenciales de desastres, así como sobre las técnicas y medidas que conducen a la reducción de las consecuencias de dichos fenómenos.

Las actividades enfocan la problemática de los Riesgos Geológicos (Sismos y Volcanes), de los Riesgos Hidrometeorológicos (Inundaciones, Huracanes, Sequías, Erosión) y de los Riesgos Químicos (Incendios, Explosiones, Contaminación por Desechos Industriales).

Los resultados de los estudios se publican en Informes Técnicos que se distribuyen a las instituciones y los especialistas relacionados con cada tema específico.

En adición a dichos Informes Técnicos de carácter muy especializado, el CENAPRED ha emprendido la publicación de esta serie, llamada CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN, con el fin de dar a conocer a un público más amplio aquellos estudios que se consideran de interés más general o que contienen información que conviene quede publicada en una edición más formal que la de los Informes Técnicos.

Los catálogos de Informes Técnicos y de Cuadernos de Investigación, así como las publicaciones específicas pueden obtenerse solicitándolos por escrito a la Coordinación de Investigación del CENAPRED, o pueden consultarse directamente en su Unidad de Información.

# OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES

## RESUMEN

Los terremotos y las erupciones volcánicas se encuentran entre los peligros naturales más espectaculares; sin embargo, los desastres relacionados con el agua afectan a más personas y provocan mayores daños. De ahí que sea importante poner atención a los problemas relacionados con las inundaciones.

El presente trabajo, sirve para describir las diferentes estructuras para proteger, contra las inundaciones, vidas humanas o zonas de interés social, industrial o económico.

Se presentan de manera sucinta, algunas obras, su objetivo, los conceptos básicos de funcionamiento y las principales consideraciones para el diseño, sin pretender que la publicación sea un manual para el diseño ejecutivo de la obra, por lo que se proporciona una amplia bibliografía al respecto, donde el lector interesado en profundizar en algún tipo específico de estructura puede encontrar detalles que sean de su interés.

## ABSTRACT

The earthquake and the volcanic eruptions are among the most spectacular natural hazards; however, the disaster related with the water affect more people and provoked larger damages. Then, it is important to attend problems related with floods.

This work describes the different feasible structures to protect human lives or social, industrial or economics interest zones against the floods.

For each type of the structure, objectives and basic principles about performance are briefly described as well as principal considerations for designing proposes. However, this publication should not be considered as an extensive handbook to hydraulic design of the structures. Due to that, at the end of this paper is supplied extensive bibliography.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| <b>RESUMEN</b> .....   | 7  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 7  |
| <b>CONTENIDO</b> .....   | 9  |
| <br>   |    |
| <b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....   | 11 |
| 1.1 <b>LOS EFECTOS ADVERSOS DEL AGUA</b> .....   | 11 |
| 1.1.1    Las Inundaciones .....  | 12 |
| 1.1.2    Las Sequías .....   | 12 |
| 1.1.3    Erosión y Sedimentación .....   | 14 |
| 1.2 <b>LOS RECURSOS HIDRÁULICOS EN MÉXICO</b> .....  | 14 |
| 1.2.1    La Irregularidad de los Recursos en el Tiempo. Los Embalses: una Necesidad Permanente ..... | 14 |
| 1.2.2    La Irregularidad Geográfica de los Recursos. Escasez y Abundancia .....                     | 15 |
| <br>   |    |
| <b>CAPÍTULO 2 PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES: ESTADO DEL ARTE</b> .....                              | 17 |
| 2.1 <b>GÉNESIS DE LAS INUNDACIONES</b> .....   | 17 |
| 2.1.1    Consecuencias de las Inundaciones .....   | 18 |
| 2.2 <b>MEDIDAS NO ESTRUCTURALES</b> .....  | 20 |
| 2.2.1    Medidas Permanentes .....   | 21 |
| 2.2.2    Medidas de Operación .....  | 22 |
| 2.3 <b>MEDIDAS ESTRUCTURALES</b> .....   | 23 |
| 2.3.1    Clasificación del Tipo de Obra .....  | 23 |
| 2.4 <b>DELIMITACIÓN DE ZONAS INUNDABLES</b> .....  | 24 |
| 2.4.1    Métodos hidrometeorológicos .....   | 25 |
| 2.4.2    Análisis estadístico .....  | 26 |
| 2.4.3    Métodos indirectos y características geomorfológicas .....                                  | 26 |
| <br>   |    |
| <b>CAPÍTULO 3 OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES</b> .....                                      | 27 |
| 3.1 <b>BORDOS</b> .....  | 27 |
| 3.1.1    Consideraciones Generales .....   | 27 |
| 3.1.2    Medidas de Conservación .....   | 29 |
| 3.1.3    Principales Fallas .....  | 29 |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 3.2  | BORDOS PERIMETRALES .....   | 31        |
| 3.2.1  | Consideraciones de Diseño .....                                   | 31        |
| 3.3  | BORDOS LONGITUDINALES .....                                       | 33        |
| 3.3.1  | Consideraciones de Diseño .....                                   | 33        |
| 3.4  | MUROS DE ENCAUZAMIENTO .....                                      | 38        |
| 3.4.1  | Consideraciones de Diseño .....                                   | 39        |
| 3.5  | CAUCES DE ALIVIO .....  | 39        |
| 3.5.1  | Consideraciones de Diseño .....                                   | 40        |
| 3.6  | DESVÍOS TEMPORALES .....  | 41        |
| 3.6.1  | Consideraciones de Diseño .....                                   | 41        |
| 3.7  | CORTE DE MEANDROS .....   | 42        |
| 3.7.1  | Consideraciones Generales .....                                   | 43        |
| 3.7.2  | Consideraciones de Diseño .....                                   | 43        |
| 3.8  | PRESAS DE ALMACENAMIENTO .....                                    | 44        |
| 3.8.1  | Consideraciones de Diseño .....                                   | 45        |
| 3.9  | PRESAS ROMPE-PICOS .....  | 48        |
| 3.9.1  | Consideraciones de Diseño .....                                   | 49        |
| 3.10   | PRESAS RETENEDORAS DE AZOLVES .....                               | 51        |
| 3.10.1   | Consideraciones de Diseño .....                                   | 51        |
| 3.11   | CANALIZACIÓN O ENTUBAMIENTO DE UN CAUCE .....                     | 52        |
| 3.11.1   | Consideraciones Generales .....                                   | 53        |
| 3.12   | REFORESTACIÓN DE LA CUENCA .....                                  | 54        |
| <b>CAPÍTULO 4 CRITERIOS DE RIESGO .....</b>            |   | <b>55</b> |
| 4.1  | RELACIÓN COSTOS - BENEFICIOS .....                                | 55        |
| 4.2  | METODOLOGÍA TRADICIONAL .....                                     | 56        |
| 4.3  | DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE RIESGO MEDIANTE<br>SIMULACIÓN ..... | 57        |
| <b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b> |   | <b>59</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                              |   | <b>61</b> |
| <b>REFERENCIAS .....</b>                               |   | <b>61</b> |
| <b>RECONOCIMIENTOS .....</b>                           |   | <b>63</b> |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Se dice que los desastres naturales son uno de los problemas inherentes al desarrollo de las civilizaciones aún sin resolver. En el caso de los de tipo hidrometeorológico (que están relacionados con el agua), los patrones de desarrollo que ignoran la administración sostenible del agua están exponiendo a las comunidades a mayores riesgos de inundaciones y sequías.

Mientras las sequías se colocan en primer lugar, en cuanto a muertes humanas se refiere (cerca de 74,000 fallecimientos reportados), las inundaciones son el peligro más frecuente y ocasionan mayores pérdidas económicas (Martín, 1996). Más aún, pocos países logran evitarlas, ni siquiera aquéllos ubicados en zonas desérticas. En África, por ejemplo, la sequía es el desastre más frecuente, pero las inundaciones y catástrofes relacionadas con fuertes vientos ocupan el segundo lugar (de 1991 a 1995, las inundaciones ocasionaron casi la mitad del total de los daños económicos provocados por desastres de todo tipo).

Como puede verse, aún cuando este elemento (el agua) resulta fundamental para la vida, también puede ser causa de desastres, ya sea por exceso o escasez.

### 1.1 LOS EFECTOS ADVERSOS DEL AGUA

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos de cualquier país debido, a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su consciente explotación; sin embargo, junto con las ventajas existen también algunos "inconvenientes" tales como las inundaciones y las sequías.

En un año "normal" la cantidad de agua que escurre en los ríos varía dentro de cierto intervalo. La reflexión respecto a una serie de cuestionamientos referentes a la aseveración anterior es resultado de la misma, así surgen cuestionamientos tales como: ¿Qué se entiende por *condiciones normales*?, ¿Qué es una *avenida*?, ¿Qué es una *inundación*?

Para tratar de explicar las anteriores interrogantes, se definirá condiciones normales como un concepto teórico, ya que cada año las variables hidrológicas son diferentes a las de los otros; no obstante, el hombre tiende a pensar que existe un estado medio o normal y clasifica las estaciones o los años como húmedos o secos, cálidos o fríos, etc. de acuerdo con parámetros que se presentan comúnmente dentro de ciertos rangos o con mayor regularidad.

Por su parte, de acuerdo con el glosario internacional de Hidrología (OMM/UNESCO, 1974), *avenida* se define como: "Una elevación rápida y habitualmente breve del nivel de las aguas en un curso hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad". Estos incremento y disminución, que pueden ser frecuentes y algunos de ellos ocurrir en la mayoría de los años, constituyen el comportamiento normal del escurrimiento en un río. Por otra parte, la definición oficial de *inundación* (OMM/UNESCO, 1974), dice: "Aumento del

nivel normal del cauce"<sup>1</sup>. De esta definición se concluye que una inundación no es un acontecimiento normal sino algo eventual, lo que realmente no es así, ya que lo normal es que un río se desborde y continúe el proceso natural de erosión de sus cuencas, depositando sedimentos en las llanuras de inundación.

### 1.1.1 Las Inundaciones

En el mundo las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre, posiblemente porque el acelerado desarrollo de las comunidades modifica los ecosistemas locales, incrementando los riesgos de inundación. Otro factor que acrecienta el riesgo de las inundaciones tiene que ver con la localización, ya que cada vez hay más gente hacinada a lo largo de las orillas de los ríos y en ocasiones por las sequías se obliga a las ciudades a absorber más población de lo que sería pertinente.

Tratando de describir lo que acontece en la República Mexicana, primeramente se comenta que es afectada por precipitaciones originadas por diferentes fenómenos hidrometeorológicos. En verano (junio - octubre) las lluvias más intensas están asociadas a la acción de ciclones, en gran parte del territorio nacional. En cambio, durante el invierno las tormentas de origen extratropical y frentes polares son la principal fuente de lluvias. A estos fenómenos se suman los efectos de tipo orográfico y convectivo, que ocasionan tormentas de poca duración y extensión, pero muy intensas. Esas condiciones climatológicas dan lugar a que los ríos presenten regímenes hidráulicos muy irregulares, alternando estiajes duraderos con periodos de avenidas muy grandes.

En las planicies de los grandes ríos de México, prácticamente todos los años, se producen inundaciones derivadas por su desbordamiento. Mientras que en las zonas semidesérticas son menos frecuentes, por lo que suelen olvidarse, pero causan serios problemas cuando se llegan a presentar.

La regulación de los escurrimientos permite normalizar el régimen hidráulico de los ríos, reduciendo la relación entre los gastos máximos y mínimos; sin embargo, cuando se trata de avenidas extraordinarias resulta difícil aminorar sus gastos mayores y sólo se logra con embalses reguladores construidos para este fin. No obstante, el actual crecimiento de los centros de población, zonas industriales o de cultivo, es posible lograr una protección eficiente considerando, además de las obras para regulación, pequeños embalses de retención, encauzamientos y reubicación de centros poblacionales, entre otras medidas de protección.

### 1.1.2 Las Sequías

Si el inciso anterior trata de un problema ya grave, este (inciso) hace referencia a algo aún más grave: la sequía, y con ella la desertificación, que va en aumento. Para tratar de entender qué tan grave es esto último, se define en qué consiste el fenómeno de la sequía.

La sequía se caracteriza por la falta de agua en el suelo, afectando la vegetación, ya que ésta pierde agua por evapotranspiración o debido a que la precipitación en algún momento es

---

<sup>1</sup> El nivel del cauce no aumenta, sino la elevación de la superficie libre del agua que escurre por él.

menor que su promedio característico; cuando esta deficiencia es prolongada daña las actividades humanas y económicas, así como el equilibrio de los ecosistemas. En comparación con otros desastres naturales tales como terremotos, huracanes, inundaciones y erupciones volcánicas; la naturaleza e impacto de las sequías son más difíciles de evaluar y rara vez causan daños de tipo estructural, además sus efectos persisten y dificultan su manejo.

La mayoría de los desastres naturales son “eventos rápidos”, lo que significa que ocurren en un lapso corto (semanas) y con poca o ninguna advertencia. Pero la sequía constituye la excepción; es difícil reconocer en qué momento una temporada seca se convierte en sequía, no tiene epicentro ni ruta, le toma meses establecerse y puede prolongarse durante meses o años. Además, sus efectos son acumulativos, es decir, crece en magnitud con cada año adicional que se prolonga.

Los efectos de las sequías son menos obvios (que los del resto de fenómenos naturales) y se extienden durante un periodo mayor y una área geográfica más amplia que las de los otros desastres naturales.

De acuerdo con el clima (SeGob, 1991), la sequía se clasifica en:

- **Permanente.** Se produce en zonas de clima árido.
- **Estacional.** Se observa en sitios con temporadas lluviosas y secas bien definidas.
- **Contingente.** Se presenta en cualquier época del año, es debida a periodos prolongados de calor, a la falta de precipitación o ambas.
- **Invisible.** Ocurren cuando las lluvias de verano no cubren las pérdidas de humedad por evaporación.

Ahora bien, desde el punto de vista de su magnitud (SeGob, 1991), se clasifica en:

- **Leve.** Tiene como causa la escasez parcial de precipitación y su repercusión principalmente, no es importante en la producción ni en la economía.
- **Moderada.** Es originada por una reducción significativa de la precipitación, afectando la producción agrícola.
- **Severa.** Se produce por la disminución general o total de lluvias; junto con estos se tienen daños cuantiosos en la producción tanto agrícola como ganadera.
- **Extremadamente severa.** Es consecuencia de la permanente escasez de agua, provocando crisis en la agricultura y la ganadería.

No obstante lo antes mencionado, los efectos debidos a este fenómeno se pueden disminuir con una adecuada explotación de los volúmenes de agua disponibles. Citando, como ejemplo, al territorio nacional y conociendo la irregularidad meteorológica que lo afecta, no es raro encontrar periodos registrados de sequía intensa que han llegado a prolongarse por más de cuatro años consecutivos, como ocurrió en los años noventa y que fue posible afrontar gracias a la infraestructura hidráulica desarrollada junto con una adecuada explotación del recurso líquido.

### **1.1.3 Erosión y Sedimentación**

Un error común referente a la desertificación es creer que es provocada por el avance del desierto y su invasión hacia zonas verdes. Sin embargo la degradación del suelo puede ocurrir en lugares bastante alejados de los desiertos, y a menudo así sucede. Más aún, la presencia del desierto puede no tener relación directa con la desertificación. Ésta, generalmente se inicia en un punto del terreno donde el suelo ha sido sobreexplotado, de persistir esta condición, el área afectada puede ampliarse desde ese punto hacia zonas vecinas hasta integrarse y crear “minidesiertos” (no es usual que este fenómeno se desarrolle a gran escala).

Ahora bien, aunque este fenómeno no provoca las sequías, sí puede propiciar que éstas sean más prolongadas o frecuentes. Por otra parte, la sequía sí contribuye a la desertificación incrementando la probabilidad de que la tasa de degradación se agrave; sin embargo, al presentarse precipitaciones, las tierras bien administradas pueden recuperarse de las sequías. El abuso en el uso del suelo, durante periodos de precipitaciones tanto abundantes como escasas, propicia la desertificación.

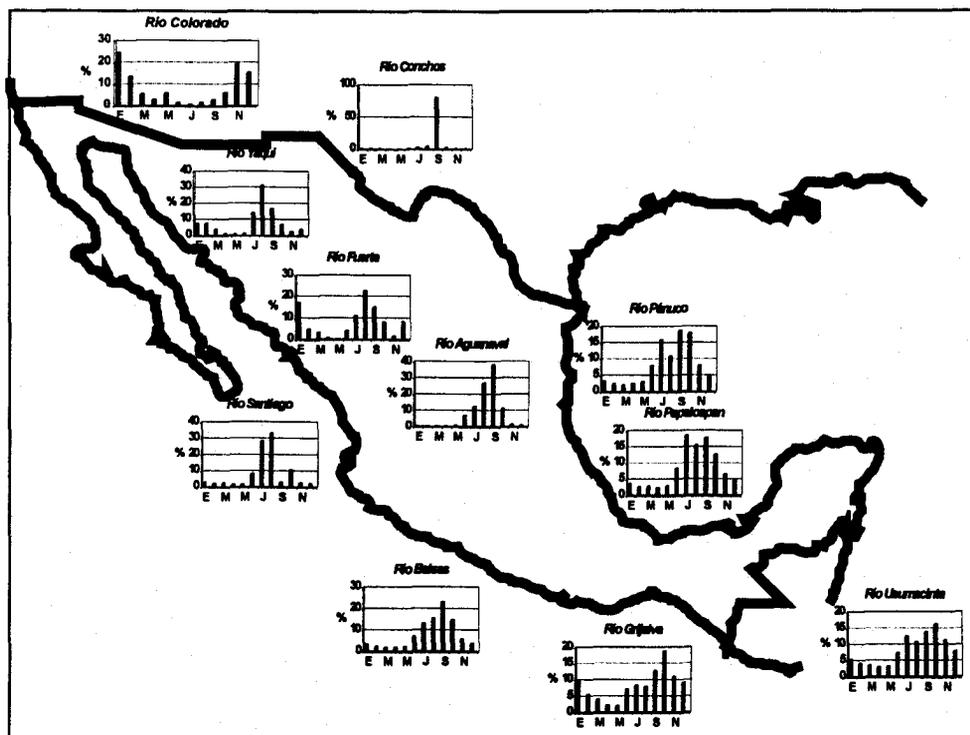
Como muchos procesos en la naturaleza, la relación erosión - desertificación es cíclica, debido a que una es consecuencia de la otra, y viceversa; es decir; la erosión es un agente generador de la desertificación, ya que cuando el agua escurre por el terreno desprende y transporta material en suspensión y arrastre de fondo. Además la disolución de sus sales, para luego depositarlas cuando su velocidad disminuye y la capacidad de arrastre es insuficiente. No debe pasarse por alto que la falta de cobertura vegetal favorece la erosión de los suelos.

El depósito de ese material (sedimentación) se realiza en las partes medias y bajas de los ríos dando lugar a una reducción de la sección transversal de los cauces, lo que aumenta la ocurrencia de inundaciones durante la época de avenidas. Por lo mismo (como se verá en los incisos 3.8 y 3.9), es necesario disponer de una mayor capacidad de almacenamiento en los embalses reguladores, obligando a poner una especial atención al problema del azolvamiento de los mismos, para conservar durante el mayor tiempo posible la capacidad muerta durante la vida útil de la presa y, al mismo tiempo, no disminuir las secciones transversales de los cauces.

## **1.2 LOS RECURSOS HIDRÁULICOS EN MÉXICO**

### **1.2.1 La Irregularidad de los Recursos en el Tiempo. Los Embalses: una Necesidad Permanente**

El territorio nacional cuenta con periodos de estiaje y de avenidas claramente diferenciados, así es posible mencionar que de junio a noviembre se presenta la época de avenidas mientras que el estiaje ocurre de diciembre a mayo (figura 1), aunque existen algunos fenómenos hidrometeorológicos que propician anomalías características de ciertas zonas. Por ejemplo, durante los meses de diciembre y enero, en el noroeste del país se generan las llamadas vaguadas o equipatas, que no son otra cosa que lluvias de invierno.



**Figura 1** Disponibilidad de agua en el tiempo. Porcentaje del escurrimiento anual (SRH, 1976).

Debido a esa variación en la disponibilidad del recurso, y como se verá más adelante, es indispensable la construcción de obras cuya finalidad es almacenar agua durante los meses de abundancia para utilizarla en periodos en los que sea escasa.

### 1.2.2 La Irregularidad Geográfica de los Recursos. Escasez y Abundancia

En las regiones del país donde el periodo de lluvias es más prolongado y abundante, como sucede en la llanura tabasqueña, los ríos son permanentemente caudalosos. En el territorio nacional existen 47 ríos importantes, mismos que fluyen en tres diferentes vertientes: del golfo, del pacífico y del interior.

Por otro lado, los daños provocados por las sequías, alcanzan magnitudes superiores a las causadas por las inundaciones. En términos generales, los estados más afectados por las primeras son: Coahuila, Durango, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Nuevo León, Querétaro, Tamaulipas y Zacatecas.

En la figura 2 se muestra la disponibilidad de agua dentro del territorio nacional. Esta imagen muestra cómo el país se divide (desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso) en dos grandes regiones: la sureste, donde existe abundancia del recurso y la norte cuya característica es la escasez de este vital líquido.



**Figura 2 Disponibilidad del agua en el territorio nacional (SRH, 1976).**

## CAPÍTULO 2

### PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES: ESTADO DEL ARTE

#### 2.1 GÉNESIS DE LAS INUNDACIONES

En el pasado, las poblaciones entendían la naturaleza de las inundaciones no en términos estadísticos sino como un elemento del medio ambiente con el que se mantenían en estrecho contacto diario. La gente vivía cerca de los ríos para aprovecharlos como medio de transporte y fuente de abastecimiento de agua para su consumo y cultivo de sus fértiles llanuras de inundación; pero de ser posible, sus hogares eran construidos en terrenos altos, para evitar afectaciones debidas a las inundaciones.

El aumento de la población y la falta de prevención al establecer nuevos asentamientos, obligó a la gente a vivir en las propias llanuras de inundación, lo que a su vez provocó que los ingenieros construyeran obras de aprovechamiento, o bien, canales para desviar las aguas de los centros de población. A medida que aumentó la población, y con ello las inversiones en las zonas propensas a inundaciones, creció también la responsabilidad de los ingenieros para proporcionar una mejor protección contra las inundaciones. La respuesta han sido grandes inversiones en todo el mundo para la construcción de diques para el control de crecidas, canales de desviación y, en general, obras de protección contra inundaciones. Por todo lo anterior, cabe preguntarse: ¿Qué ha hecho que cambie nuestra relación con el fenómeno de las inundaciones?

La respuesta es triple: hemos cambiado nosotros, han variado las inundaciones y se ha modificado nuestra apreciación de la inundación.

El primero se ha producido en las poblaciones mismas: el número de personas que viven y trabajan en tierras originalmente ocupadas por el cauce, y que ocasionalmente vuelven a ser ocupadas por éste (llanuras de inundación), se ha incrementado. Este aumento de la población, junto con la gestión deficiente de los recursos, ha generado una transformación: las zonas boscosas pasan a ser pastizales y tierras de cultivo. La consecuencia: el volumen de agua retenido en la parte alta de las cuencas es menor y escurre más rápido hacia la llanura, consecuentemente las inundaciones son más frecuentes y graves.

El ejemplo extremo, más peligroso y por desgracia cada vez más común está representado por la inundación repentina que ocurre en las zonas urbanas. Estos eventos son consecuencia de la "cubierta impermeable" formada artificialmente por los edificios y calles, por lo que el agua no puede infiltrarse y prácticamente todo el volumen precipitado se convierte en escurrimiento. Así, donde antes una tormenta humedecía la tierra y regaba la hierba y los árboles, bastan unos cuantos minutos para generar una avenida que arrastra todo a su paso. Sólo existe una situación más grave: si las obras destinadas para protección resultan insuficientes, la inundación resultante será mayor que la producida de no existir dichas obras.

El segundo se ha producido en las inundaciones: los seres humanos han alterado el entorno con tal de lograr sus propios fines y con ello se han establecido las condiciones que frecuentemente dan lugar a inundaciones más graves.

Como ocurre en todas las catástrofes, los diferentes tipos de medidas de protección no sólo dependen de los fenómenos físicos en cuestión, sino también de las circunstancias sociales y del grado y naturaleza de la respuesta humana prevista. En muchos casos las poblaciones han perdido el contacto con su entorno y, aún dentro de la región en la que viven y trabajan, no conocen los sitios por donde escurre el agua en forma natural; el más claro ejemplo de eso está representado por las ciudades: las corrientes han sido canalizadas e incluso cubiertas; no obstante el agua de lluvia, al igual que las residuales, son drenadas por el alcantarillado y en ningún caso la gente sabe cómo ni porqué. Por consiguiente, el tercer cambio se ha producido en la apreciación de las inundaciones por parte de las personas, al creer que la inundación se ha eliminado y ya no es una amenaza o algo que deba preocupar, por lo que no se ve motivo para tenerla dentro de sus planes.

Para evitar o reducir las inundaciones o sus efectos perjudiciales se pueden tomar acciones de dos tipos: las primeras se conocen como medidas estructurales (construcción de obras), y las segundas son las no estructurales (indirectas o institucionales).

El objetivo de las estructurales es evitar o reducir los daños provocados por una inundación, mediante la construcción de obras que pueden ser planeadas y diseñadas cuidadosamente (usualmente a cargo de dependencias gubernamentales, ya que se requiere de fuertes inversiones para su realización y conservación). Por ejemplo, para proteger una zona urbana que es cruzada por un río se pueden proponer como medidas estructurales la retención, almacenamiento y derivación del agua, hacer modificaciones al cauce (canalizarlo o entubarlo), construir bordos o muros de encauzamiento y modificar puentes y alcantarillas.

Por su parte, entre las medidas no estructurales se cuentan aquéllas cuya finalidad es informar con oportunidad a las poblaciones ribereñas de la ocurrencia de una posible avenida, para que los daños sean mínimos (si es que no se evitan). Dichas acciones se llevan a cabo en menos tiempo que las de tipo estructural.

Desde el punto de vista económico, las medidas estructurales y no estructurales tienen mayor aplicación en las zonas que ya están desarrolladas; mientras que en las áreas poco desarrolladas sólo se puede justificar la aplicación de las segundas.

Concluyendo, se puede mencionar que las acciones estructurales tienden a resolver el problema de las inundaciones mientras que la misión de las no estructurales es prevenirlo.

### **2.1.1 Consecuencias de las Inundaciones**

Se ha mencionado que las inundaciones pueden ocasionar tanto beneficios como daños, a continuación se describen ambos conceptos (Maza, 1997):

### *A) Beneficios Producidos*

Entre los principales beneficios producidos, se destacan los siguientes:

- Humedecen y fertilizan los terrenos. Debido a que los ríos, además de agua, transportan grandes cantidades de materia orgánica, limos y arcillas.
- Recargan los acuíferos. Sobre todo si los suelos son permeables y con poca pendiente.
- Contribuyen a la supervivencia de la fauna. Como resultado de que el agua almacenada en las partes bajas forma pequeñas lagunas.

En otro orden de ideas, cabe destacar que un desbordamiento puede evitar o reducir la inundación en zonas aguas abajo, que podrían estar más pobladas o tener mayor riqueza agrícola, ganadera, industrial o de servicios. Cada vez que se produce un rebosamiento del río, cierto volumen de agua se descuenta del hidrograma de la avenida que escurre a lo largo del río.

### *B) Daños Producidos*

Por otra parte, algunos de los daños que produce una inundación, bien sea por el nivel que alcanza el agua como por las velocidades a las que ésta circula, son los siguientes:

- Pérdida de vidas humanas
- Pérdida, en general, de ganado y animales
- Destrucción de cultivos
- Deterioro y destrucción de bienes materiales
- Interrupción y destrucción de vías de comunicación
- Interrupción de servicios (eléctrico, telefónico, de agua potable y drenaje)
- Propagación de enfermedades

Desde el punto de vista económico, conviene distinguir tres posibles escenarios en lo referente a la magnitud de los daños señalados

#### *a) Cuando el río se desborda con mucha frecuencia*

En las regiones donde la presencia de avenidas es común, prácticamente no hay pérdida de vidas humanas y son escasas las de animales, ya que los habitantes de la región están acostumbrados a las inundaciones y toman las precauciones necesarias; de igual forma ocurre con los muebles y pertenencias familiares, ya que durante la época de crecientes son izadas al techo de las casas o puestas, si lo hubiera, en el piso superior. Respecto a los cultivos, sólo se pierden si las avenidas se adelantan y ocurren antes de levantar las cosechas; en estas regiones más que de pérdida de cultivos se debe mencionar la imposibilidad de un segundo o tercer ciclo de cultivo.

Por último, la interrupción de las comunicaciones terrestres, así como la ocurrencia de enfermedades hídricas son daños casi siempre presentes durante las inundaciones.

**b) Cuando el río se desborda con escasa frecuencia pero conduce agua casi todo el año**

En estos ríos el periodo de retorno de las avenidas que se presentan produciendo inundaciones, es muy variable, sobre todo si tienen como fuente generadora lluvias de tipo ciclónico.

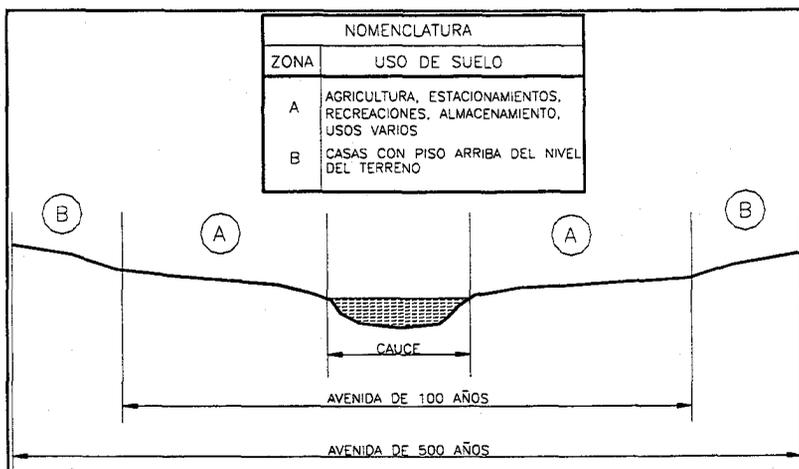
**c) Cuando el río se desborda con escasa frecuencia pero casi nunca llevan agua, excepto cuando hay avenidas**

Cuando el periodo de retorno de la avenida es grande o se trata de ríos que rara vez se desbordan o en los que casi nunca escurre agua, todos los daños señalados pueden ocurrir ya que los ribereños no están preparados para sufrir inundaciones y, aún más, muchos de ellos no tienen conocimiento de lo que es una inundación ni saben qué hacer ante la presencia de este fenómeno.

En regiones semiáridas, donde los ríos casi nunca tienen agua, se llega al extremo de construir obras dentro de los cauces, por ejemplo casas y edificios; sin embargo durante la primera avenida casi todo lo que hay dentro de ellos es destruido.

**2.2 MEDIDAS NO ESTRUCTURALES**

Este tipo de medidas no se basa en la construcción de estructuras físicas sino en la planeación, organización, coordinación y ejecución de una serie de ejercicios de Protección Civil que busca evitar o disminuir los daños causados por las inundaciones y pueden ser de carácter permanente o aplicables sólo durante la contingencia. Las principales acciones por desarrollar dentro de este tipo de medidas se relacionan con la operación de la infraestructura hidráulica existente en la región bajo estudio, los planes de Protección Civil, la difusión de boletines de alerta y la evacuación de personas y bienes afectables.



**Figura 3 Reglamentación del uso del suelo (Dominguez, 1990).**

### 2.2.1 Medidas Permanentes

Su propósito es evitar que los bienes, con un elevado valor económico y social se ubiquen dentro de zonas sujetas al riesgo de inundación.

Este tipo de medidas pretende ayudar a las personas potencialmente afectables de sufrir inundaciones con base en el alertamiento de cualquier evento de interés. Parte del supuesto de contar con una delimitación de las zonas inundables bajo diferentes escenarios (relacionando el área afectada con la magnitud del evento).

Con la información anterior, es posible estimar los daños esperados para el área de interés, pero sobre todo establecer una normatividad para el uso del suelo, que evite asentamientos humanos en zonas con alto riesgo de ser inundadas y controlar la aplicación de esa normatividad (figura 3).

A grandes rasgos, los pasos a seguir para lograr un adecuado alertamiento son:

- a) Diseñar un plan de acción que tome en cuenta las condiciones y recursos locales, así como la magnitud de los posibles daños asociados a cierta probabilidad de ocurrencia del evento.
- b) Instalar el equipo necesario para realizar un adecuado seguimiento del fenómeno hidrometeorológico en cuestión (ciclones tropicales, lluvias de invierno, etc.) para estar en posibilidades de pronosticar escenarios futuros del mismo (basados en las acciones descritas en el punto "d").
- c) Observar el comportamiento del evento (radares y equipos para la recepción de imágenes de satélite), obtener registros como pluviogramas y limnigramas (pluviógrafos o pluviómetros y limnigrafos o escalas) y establecer una transmisión periódica y oportuna de la información (radios), de ser posible, es recomendable automatizar el sistema (redes telemétricas), tanto de las zonas donde se obtiene la información hacia la central donde se realiza el pronóstico, como de ésta última hacia las potenciales zonas de evacuación.
- d) Aplicar modelos hidrológicos e hidráulicos dentro de la zona en estudio para determinar las características de la avenida, y decidir si es necesario evacuar a la población.
- e) Obtener analítica o experimentalmente los niveles alcanzados por el agua para avenidas con diferentes periodos de retorno, tanto a lo largo del río como en la planicie inundada. Cabe mencionar que esto es difícil de lograr, debido a que los modelos matemáticos o físicos requieren de gran cantidad de información y una adecuada calibración, que sólo es posible si se dispone de datos confiables (elevaciones del agua en diversos puntos a lo largo del río, gastos, rugosidades, longitud de los tramos, etc.) algunos deben ser obtenidos de los registros de avenidas anteriores.
- f) Validación de la calibración realizada en el punto anterior, con base en nuevos datos hidrométricos.
- g) Delimitar las áreas adyacentes al río (la planicie) que pueden ser cubiertas por el agua. Esto se logra cumpliendo correctamente el punto anterior; sin embargo, en la mayoría de las ocasiones no es posible, por lo que las áreas inundadas deberán de ser determinadas con base en fotografías aéreas tomadas durante inundaciones anteriores. La importancia de este punto es conocer las áreas afectadas por gastos asociados a diferentes periodos de retorno, para decidir qué zonas evacuar en función de la magnitud de la avenida que se haya pronosticado en el punto "d".

- h) El pronóstico sirve para minimizar los daños causados y, al mismo tiempo y una vez que la avenida haya transcurrido, maximizar el beneficio producto de una adecuada operación de todas las estructuras de control.
- i) Establecimiento de las acciones por ejecutar y formación de grupos que permitan, con base en las estimaciones indicadas en los puntos “d” y “e”, tomar decisiones adecuadas y oportunas antes, durante y después de la ocurrencia de la inundación.

Para que sean efectivas las actividades de protección y evacuación de las poblaciones que pueden ser afectadas, es indispensable que la alerta se de con la máxima antelación posible, pero teniendo la certeza de que efectivamente se presentará el escenario simulado. Por ello el intervalo de tiempo que transcurre desde la adquisición de los datos hasta el pronóstico de las áreas que serán inundadas debe reducirse al mínimo posible, lo que obliga al uso eficiente del equipo de registro, transmisión de datos y computadoras y métodos de cálculo adecuados.

En general, este tipo de medidas (no estructurales permanentes), son diseñadas para prevenir a la gente y a los organismos responsables de la ejecución de las medidas para la prevención de desastres. Debido a que su costo es menor que el de las estructurales, están más al alcance de los países en desarrollo; sin embargo, para lograr una buena efectividad se requiere de un grado de organización con el que, paradójicamente, muchos de estos países no cuentan.

### **2.2.2 Medidas de Operación**

Son todas aquellas medidas que se adoptan ante la presencia de un fenómeno de tipo hidrometeorológico capaz de generar una inundación. Con la finalidad de conocer la evolución del fenómeno durante sus diferentes fases (ocurrencia y cantidad de la precipitación; su transformación en escurrimiento superficial; la regulación a lo largo del cauce, defasamiento en el tiempo y atenuación del gasto máximo; alternativas para la operación de la infraestructura hidráulica; etc.) están apoyadas, fundamentalmente, en modelos para el pronóstico de avenidas. Algunas de estas medidas se comentan a continuación:

- a) Establecer y elaborar programas, procedimientos y normas a seguir desde que se detecte un fenómeno que pueda ocasionar un desastre.
- b) Organizar y coordinar todas las acciones, personas y dependencias gubernamentales y privadas relacionadas con el desastre.
- c) Entrenar al personal responsable de las acciones que procedan antes, durante y después de la contingencia.
- d) Capacitar a las personas que pueden ser afectadas, para que sepan qué hacer, con quién y dónde acudir ante la presencia de un fenómeno extraordinario.
- e) Establecer un sistema de alerta que permita avisar oportunamente a la población, la presencia de algún fenómeno que pueda generar un desastre, si es predecible.
- f) Operar y conservar la infraestructura para mitigar o evitar un desastre.
- g) Evacuar en forma segura a la población que sea o pueda ser afectada.
- h) Ayudar a la población en peligro. Incluye la selección, construcción y operación de albergues y centros de primeros auxilios.

- i) Ayudar a la población afectada, proporcionando techo y alimentos hasta que pueda ser reacomodada o reparadas sus viviendas.
- j) Restaurar, en el menor tiempo posible, todos los servicios interrumpidos durante el desastre; entre ellos los de agua potable, drenaje y energía eléctrica.
- k) Evaluar las medidas adoptadas, así como de sus logros y deficiencias para retroalimentar los puntos a y b.

## 2.3 MEDIDAS ESTRUCTURALES

Contrariamente a las acciones no estructurales, los estructurales están constituidas por cualquier obra de infraestructura hidráulica que ayude a controlar inundaciones. Este objetivo se puede lograr de dos maneras: mantener el agua dentro del cauce del río, o bien, evitar que el agua que ha salido de los cauces alcance poblaciones o zonas de gran interés.

### 2.3.1 Clasificación del Tipo de Obra

En función de la manera en que es manejada la corriente, se pueden definir tres grandes grupos de obras:

- *Obras de regulación.* Estas acciones consisten en la construcción de obras que intercepten directamente el agua de lluvia o la que escurre por los cauces para almacenarla en una área previamente seleccionada. Este grupo de estructuras está integrado fundamentalmente por presas (de almacenamiento, rompe-picos, etc.) y cauces de alivio (permanentes o temporales) que permiten almacenar temporalmente toda, o al menos una parte, de la creciente generada en la parte alta de la cuenca tributaria y, posteriormente, descargarlas en forma controlada.
- *Obras de rectificación.* Su función es facilitar la conducción rápida del agua por su cauce, dragando los ríos para conservar o incrementar su capacidad, algunas de las estructuras que forman parte de este grupo de obras son: la rectificación de los cauces (por medio de la canalización o el entubamiento de los ríos), o bien, el incremento de la pendiente (mediante el corte de meandros).
- *Obras de protección.* Confinan el agua dentro del cauce del río (bordos longitudinales a lo largo del río) o bien evitar que la inundación alcance poblaciones o zonas de importancia (bordos perimetrales).

De acuerdo con lo anterior, una clasificación de las obras de protección contra inundaciones, atendiendo al manejo de la avenida, es:

**Tabla 2.1 Clasificación de las obras de protección contra inundaciones más comunes, por tipo**

| <b>Obras de regulación</b>    | <b>Obras de rectificación</b>   | <b>Obras de protección</b> |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| - Presas de almacenamiento    | - Canalización del cauce        | - Bordos longitudinales    |
| - Presas rompe-picos          | - Entubamiento del cauce        | - Bordos perimetrales      |
| - Presas para retener azolves | - Corte de meandros             | - Muros de encauzamiento   |
| - Desvío permanente           | - Rectificación de la corriente |                            |
| - Desvío temporal             |                                 |                            |

Las obras más utilizadas en México, son las pertenecientes a los grupos uno y tres, específicamente: bordos tanto perimetrales como longitudinales, muros de encauzamiento, desvíos permanentes y presas de almacenamiento. De ellas, las dos últimas son las más efectivas, ya que el gasto máximo de la avenida disminuye en todo el tramo del río aguas abajo de ellas (las estructuras).

Por su parte, las presas rompe-picos se utilizan en corrientes donde la avenida de diseño es pequeña; su efecto se pierde en cuanto se unen varias corrientes, debido a que se incrementa la capacidad de regulación necesaria, lo que encarece el proyecto.

Las presas para retener azolve no alteran el gasto máximo de la avenida, pero evitan o retardan el azolvamiento de los cauces aguas abajo de ellas; si no se evita ese azolvamiento, los cauces pierden capacidad hidráulica y su desbordamiento ocurre con gastos menores a los estimados inicialmente.

Los desvíos temporales son recomendados cuando la avenida de diseño es esbelta y, además, se cuenta con zonas de desvío con capacidad de almacenamiento considerable o es factible construir varios desvíos a lo largo del río.

El corte de meandros, rectificaciones, dragados y destrucción de obstáculos tiene un efecto local que, en ocasiones, puede ser muy efectivo.

La reforestación es una opción más, sólo que el tiempo necesario para lograr su efectividad es mayor que el de las otras opciones, además es necesario llevarla a cabo en grandes extensiones para que sea efectiva, lo que exige una organización y coordinación gubernamental eficiente, adicionalmente hay que realizar grandes inversiones; el problema es que frecuentemente se contraponen con el uso de suelo.

Normalmente, sólo en situaciones muy particulares una sola de las acciones mencionadas resuelve completamente el problema; como generalmente están involucradas grandes extensiones, se requiere la combinación de varias de esas medidas.

## **2.4 DELIMITACIÓN DE ZONAS INUNDABLES**

Debido al gran impacto que representa esta acción por sí sola, es importante realizar comentarios más extensos.

El objetivo, desde el punto de vista de la Protección Civil, consiste en identificar y delimitar las zonas propensas a sufrir inundaciones y, posteriormente, estimar los niveles alcanzados por el agua para diferentes escenarios.

La tarea planteada en el párrafo anterior no es fácil; sin embargo, existen algunas metodologías con las que puede resolverse dicho problema.

En los apartados siguientes se comentan los procedimientos más comunes.

03552

**2.4.1 Métodos hidrometeorológicos**

Puesto que en la mayoría de los casos los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento, y además no se afectan por cambios en la cuenca (construcción de obras de almacenamiento y derivación, urbanización, talas, etc.), es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca a través de sus características intrínsecas y de la precipitación. Así pues, la idea de partida es el ciclo hidrológico.

Con lo anterior se simulan las diferentes etapas del fenómeno de acuerdo con el grado de aproximación requerido, o con la disponibilidad de información en cuanto a calidad y cantidad.

A grandes rasgos, estos métodos consisten en una secuencia como la siguiente:

**Cuadro 2.1 Secuencia de cálculo para los métodos hidrometeorológicos**



Debido a lo complicado de algunos procesos naturales una de las principales restricciones de estos modelos es la precisión de los resultados del proceso que simulan; sin embargo, la importancia de este problema depende del propósito de los resultados, por lo que en ocasiones puede salvarse el inconveniente.

Aún con la anterior afirmación, la principal limitante de estas metodologías, es la disponibilidad de información necesaria para su calibración, debido a que en muchos casos la escasez de datos hace aventurado extrapolar resultados. Afortunadamente, hoy en día, algunos países ya cuentan con la tecnología y la capacidad económica para obtener tal información. Se espera que algún día pueda extenderse dicha afirmación a las naciones en desarrollo.

### **2.4.2 Análisis estadístico**

Una vez que se relaciona el periodo de retorno del gasto de diseño de cualquier obra, generalmente, para conocer dicho gasto es necesario extrapolar los gastos máximos anuales ya que en contadas ocasiones el periodo deseado es menor al de los datos.

Al contar con un registro de gastos máximos si éstos se dibujan contra sus respectivos periodos de retorno, normalmente se observa alguna tendencia; sin embargo, el principal problema radica precisamente en extender dicha tendencia hasta el periodo de retorno deseado. El mejor camino para realizar esa tarea es buscar entre las distintas funciones de distribución de probabilidad aquélla que mejor se ajuste a los datos.

Lo anterior se pone de manifiesto al tomar en cuenta que los registros históricos de la corriente son el punto de partida para extrapolar hasta el periodo de retorno de interés (hacia épocas en las que no había estaciones de aforo, e incluso a sitios en los que no se cuenta con mediciones) y aunque comúnmente se debe trabajar con registros discontinuos, por la relativa sencillez para realizar los ajustes, ésta es la metodología más empleada.

La existencia de datos históricos de avenidas, fuera del periodo sistemático del registro (comúnmente llamados referencias históricas), proporciona información adicional de gran interés; sin embargo, una dificultad habitual al utilizar datos históricos es la elevada incertidumbre que presentan. Por otra parte, estos datos no son caudales sino niveles alcanzados por el agua dentro de un cauce con una morfología desconocida que complica la estimación hidráulica de tales gastos; sin embargo, a falta de mayor información, estos datos ayudan al ingeniero para sensibilizarse con respecto al posible comportamiento de la corriente. Cuando se dispone de una serie de años de registro sistemático y de datos de avenidas históricas en años anteriores, existen algunas metodologías (Ferrer, 1992) para aprovechar esta información.

### **2.4.3 Métodos indirectos y características geomorfológicas**

Parten de un reconocimiento de las características físicas del medio natural y proporcionan información referente a la ubicación y delimitación de las zonas susceptibles de ser inundadas y cuáles son los procesos que pueden producirse.

El principal inconveniente es que requiere de la participación de técnicos con un profundo conocimiento del comportamiento de las corrientes del lugar. No obstante, en la gran mayoría de los casos, la información obtenida de este análisis es cualitativa, por lo que no se cuantifican los efectos producidos por cada fenómeno.

## CAPÍTULO 3

### OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES

Dentro de los proyectos de ingeniería el factor de seguridad es un concepto fundamental. Así pues, al hablar de obras de protección contra inundaciones de inmediato surge el concepto del "bordo libre", que no es más que la sobreelevación del nivel de las obras de protección por encima del nivel máximo del agua alcanzado por la avenida de diseño. La forma viable para determinar dicha sobreelevación es definir arreglos en los que no haya derrames para los niveles resultantes de una avenida con cierto periodo de retorno; como se mencionó en el punto 2.4.2. Esta metodología requiere una serie de registros históricos que relacionan gastos máximos con periodos de retorno; sin embargo el problema no termina ahí, ya que no es sencillo seleccionar el periodo de retorno adecuado.

Aceptar que el bordo libre aumenta el grado de seguridad de las obras, no justifica el incremento del factor de seguridad de las mismas a través de un dimensionamiento arbitrario. Cuando no se cuenta con los medios adecuados para estimar los beneficios de una obra de protección en función de su costo lo anterior podría resultar erróneo (y peligroso) ya que difícilmente se puede estimar cuál es la solución óptima.

A continuación se presentan las ideas básicas para planear y diseñar una serie de obras de defensa contra inundaciones, con diferentes características en cuanto a la concepción de su diseño y funcionamiento, su finalidad es la misma: proteger los centros de población o las zonas de interés. Al final de este trabajo se esbozan las ideas fundamentales para realizar el diseño de este tipo de obras fundamentado en un análisis de riesgo.

#### 3.1 BORDOS

Generalmente son terraplenes, de arcilla cuyo objetivo es proteger vidas humanas y zonas de interés social o industrial contra las sobreelevaciones del nivel del agua en el cauce de inundación. Su diseño es semejante al de pequeñas cortinas de tierra, pero la principal diferencia es que los bordos retienen agua sólo por periodos cortos de tiempo (días o cuando mucho semanas).

##### 3.1.1 Consideraciones Generales

Su alineamiento debe seguir la configuración de la zona por proteger; debe tomarse en cuenta que los drenes o cualquier tipo de excavación no deberá practicarse al pie de sus taludes, ya que se incrementa la posibilidad de inestabilidades del mismo.

Es importante tener presente que así como el bordo es una barrera que evita el desbordamiento del río al impedir el paso del agua de éste hacia las zonas protegidas, también representa un obstáculo para el desalojo del agua que cae dentro de la zona protegida, motivo por el que es necesario contar con un sistema de drenaje capaz de evitar que dicha zona se inunde por la lluvia que cae en ella.

Este tipo de estructuras puede clasificarse de acuerdo con la forma de proteger la zona de interés en: bordos longitudinales o perimetrales. Los problemas que se enfrentan durante su diseño y construcción varían de un proyecto a otro; no obstante, un diseño adecuado requiere de una serie de estudios y actividades (Maza, 1997) que se mencionan a continuación:

- **Estudios geológicos.** Su finalidad es conocer las condiciones geológicas del terreno para identificar los posibles problemas por enfrentar durante el diseño, construcción y operación de la estructura, o bien, relocalizar trazos de trayectorias alternativas.
- **Estudio preliminar de las condiciones del sitio.** Con este estudio se identifican los posibles bancos de materiales para explotarlos durante la construcción de la obra.
- **Exploración final.** El objetivo es definir de manera más precisa el perfil estratigráfico del subsuelo por donde será desplantando el bordo, además de proporcionar información detallada referente a las áreas de préstamo.
- **Estimación de terraplenes.** Se lleva a cabo una primera estimación de la geometría de las secciones transversales de los terraplenes así como las condiciones de la cimentación.
- **Propuesta de secciones típicas.** Se definen longitudes de tramos con altura similar, condiciones de desplante afines y el mismo material de relleno, con la finalidad de trazar una sección representativa de cada tramo.
- **Flujo subterráneo y a través del terraplén.** Para cada sección transversal se llevará a cabo el estudio del flujo (por debajo y a través ésta), la estabilidad de sus taludes y los posibles asentamientos.
- **Identificación de zonas problemáticas.** Se identifican cuáles son las zonas que requieran un tratamiento especial para mejorar las condiciones de desplante de los bordos.
- **Definición de secciones típicas.** Una vez realizadas los análisis anteriores, se definen las secciones típicas para cada tramo.
- **Volúmenes de obra.** Una vez determinada la geometría de las secciones, se procede a cuantificar el material necesario para la construcción.
- **Zonas de préstamo.** Los bancos de materiales se ubican en función de los volúmenes requeridos.
- **Protección del terraplén.** De ser necesario, se diseña la protección requerida por el terraplén.

Si los estudios antes descritos se realizan durante las etapas de diseño y construcción, las posibilidades de que se presente una falla en la obra son mínimas; sin embargo, no se tiene la certeza de un diseño exitoso al 100 %, por lo que el USBR (United States Bureau of Reclamation) recomienda una intensa campaña tanto en campo como en laboratorio (las pruebas más importantes son las de esfuerzos, consolidación y compresión, contenido de agua e identificación de materiales), cuando se detecte cualquiera de las condiciones siguientes:

- La falla del bordo ocasiona grandes pérdidas, de vidas o daños materiales
- Los bordos tengan una altura mayor de 4.00 m
- La zona de desplante es débil y compresible, el terreno muy variable a lo largo del alineamiento o se tengan problemas de flujo subterráneo
- El agua esté en contacto con el terraplén por largos periodos de tiempo
- Los bancos de préstamo sean de baja calidad o el contenido de agua sea alto
- Existan estructuras de concreto en algún sitio por donde pasará el bordo

### 3.1.2 Medidas de Conservación

Una vez realizado un buen diseño y una adecuada construcción, para asegurar el cumplimiento de sus objetivos, un bordo debe ser revisado frecuentemente. Dentro de este tipo de medidas se consideran las siguientes:

#### *a) Nivelaciones periódicas de la corona*

El objetivo de realizar esta actividad consiste en localizar oportunamente cualquier asentamiento para efectuar la re-nivelación antes de la siguiente temporada de lluvias.

#### *b) Revisión de taludes*

Su finalidad es observar y determinar las posibles zonas erosionadas, daños en la coraza de protección o cualquier otro problema que deba ser solucionado.

### 3.1.3 Principales Fallas

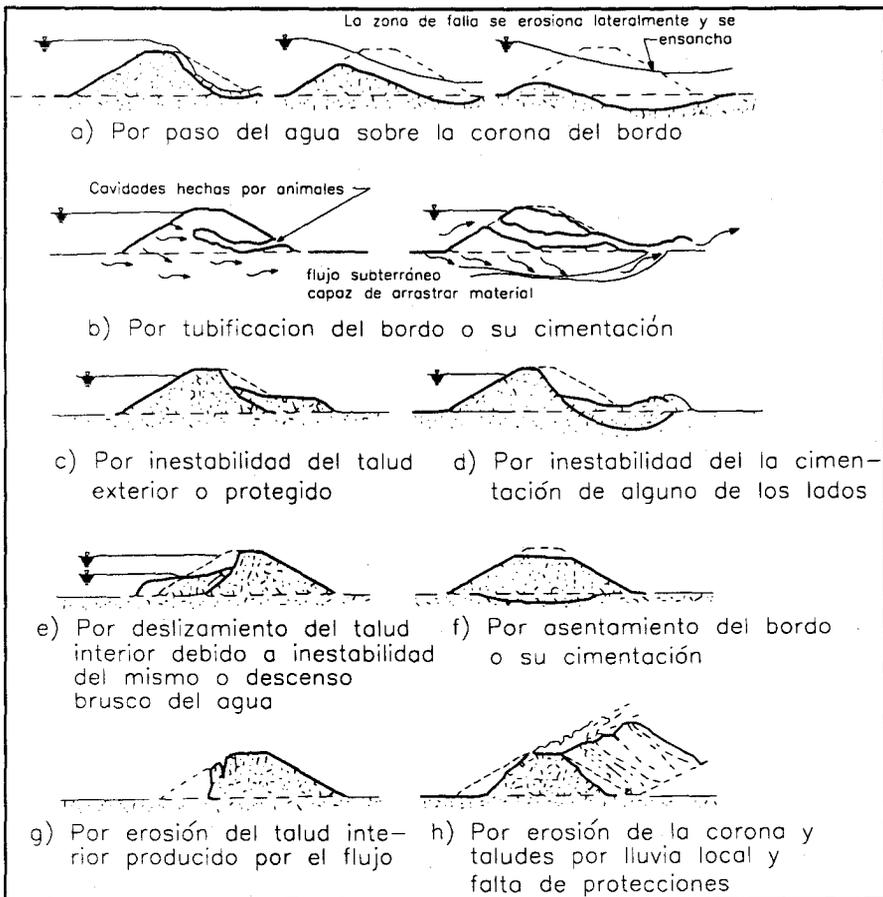
Las causas de falla más comúnmente detectadas (Maza, 1997) en bordos son (figura 4):

#### • *Desbordamiento del bordo*

Cuando el agua paso sobre la corona del bordo puede erosionarse el talud del lado seco e incrementarse hacia la corona, hasta producir una abertura en el terraplén.

#### • *Erosión del terraplén del lado húmedo*

Para que este problema se presente es necesario que el flujo se concentre y el terraplén carezca de protección. En ocasiones, el río se desplaza lateralmente llegando hasta el pie del talud, por lo que de continuar la erosión la falla del talud es inevitable.



**Figura 4 Principales fallas en bordos (Maza, 1997).**

- **Deslizamiento de taludes por saturación**

Generalmente, se debe a un diseño inadecuado, un mal control de calidad durante su construcción, o bien, por no tomar en cuenta las condiciones de la cimentación.

- **Tubificación**

Su formación es debida a filtraciones a través del cuerpo del terraplén o su cimentación. Consiste en el establecimiento de un flujo capaz de arrastrar las partículas del material, con lo que se forma un conducto que avanza de aguas abajo hacia aguas arriba. El fenómeno descrito es muy lento al principio pero se acelera conforme pasa el tiempo.

Las principales causas que originan este problema son dos: a) deficiencia en el diseño (por ejemplo: flujo a través del terraplén o la cimentación con arrastre de material); b) causas ajenas al diseño (algunos animales sitúan su madriguera cerca de los taludes del bordo o debido al crecimiento de raíces de árboles).

- **Hundimiento**

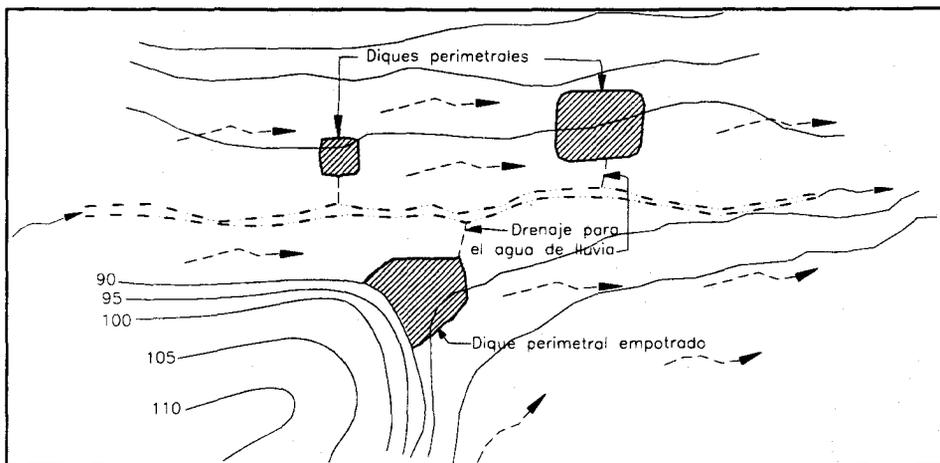
Se presenta debido a una compactación deficiente del terraplén o consolidación y falla de la cimentación, disminuyendo la elevación de la corona por lo que aumenta la posibilidad de que el bordo sea rebasado.

- **Erosión debida a la lluvia**

Este problema sólo se presenta ante una falta de las medidas mínimas de conservación y supervisión, o bien, cuando el bordo no cuenta con protección exterior (la corona no está revestida y no se coloquen bajadas de agua).

### 3.2 BORDOS PERIMETRALES

Como se mencionó, la tendencia natural es crear asentamiento cerca de corrientes naturales, por lo que la solución más común para proteger dichos centros de población consiste en rodearlos parcial o totalmente con bordos, dependiendo de la topografía local (figura 5), la ventaja consiste en que es la solución más económica además de no alterar el nivel de los escurrimientos.

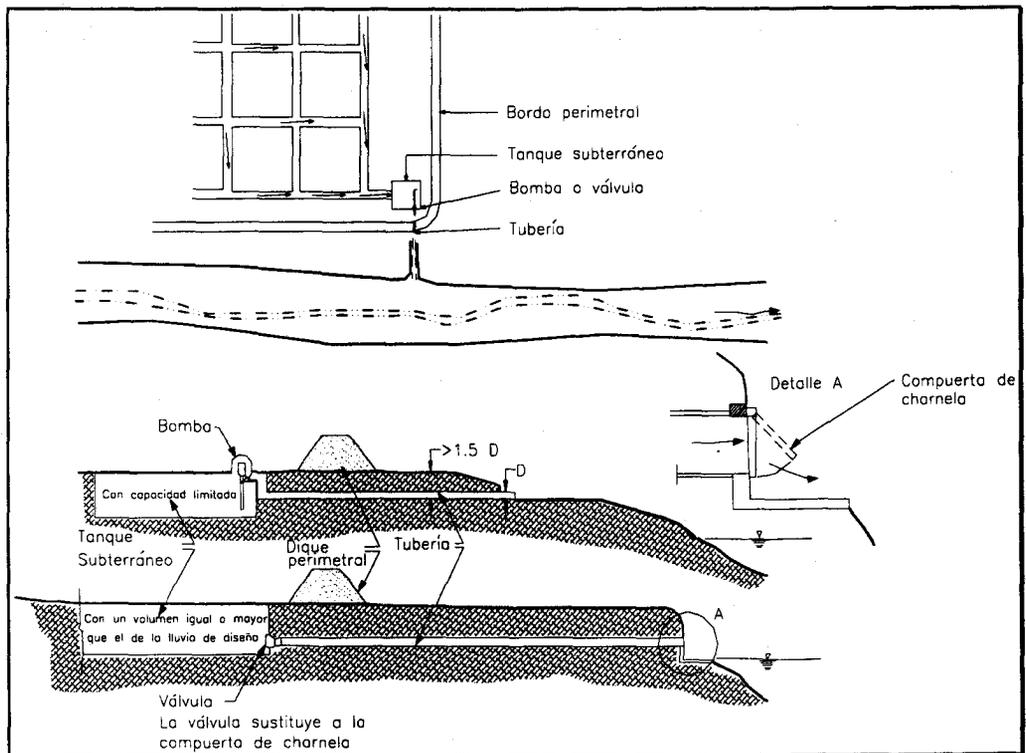


**Figura 5 Arreglo general de bordos perimetrales (Maza, 1997).**

#### 3.2.1 Consideraciones de Diseño

- La altura del bordo se define con base en los niveles máximos registrados, a esa cota máxima se agrega un bordo libre de 1.00 ó 2.00 m, esto dependerá fundamentalmente de la confianza que se tenga en los datos, en caso de existir alguna estación de aforo, se trabajará con la información que de ella se tenga.

- Una vez definida la construcción de la obra, desde el inicio de los trabajos, la corriente deberá instrumentarse (colocando algunas escalas y garantizando su aforo). El objetivo de esto es obtener valores que permitan calibrar cualquier modelo de simulación que se utilice posteriormente.
- El ancho de la corona deberá permitir el tránsito de un vehículo, lo que implica proporcionar un mínimo de 3.00 m.
- Debido a que el bordo es una frontera entre el poblado y el río, el agua de lluvia que caiga dentro de la zona confinada deberá ser drenada (figura 6).



**Figura 6 Alternativas para drenar áreas protegidas con bordos (Maza, 1997).**

La figura anterior, ejemplifica las soluciones viables de drenaje, dependiendo del volumen de escurrimiento que se espere.

**a) Volumen de escurrimiento poco considerable**

Cuando el volumen de la avenida estimado sea relativamente pequeño, deberá construirse un depósito comunicado con el río por medio de una tubería que pase por debajo del bordo (a una profundidad no menor de 1.5 veces el diámetro de la misma) y cuente con una compuerta para desalojar el agua almacenada una vez que baje el nivel del río y se cierre cuando éste suba.

**b) Volumen de escurrimiento considerable**

Por otra parte, cuando el volumen estimado sea considerable, se construirá un tanque, con una estación de bombeo dimensionados en función del gasto máximo esperado, en cuyo caso el agua recolectada será reincorporada a la corriente.

**3.3 BORDOS LONGITUDINALES**

Como su nombre lo indica, son estructuras que se construyen a lo largo de las márgenes de la corriente y al confinar el agua entre ellos (los bordos), protegen simultáneamente varias poblaciones así como grandes extensiones de terrenos agrícolas. Las inundaciones se evitan al confinar los escurrimientos dentro de secciones más estrechas que las naturales, por lo que se produce una sobreelevación del nivel del agua (con respecto a las condiciones naturales); además, al no permitir desbordamientos la avenida sólo se traslada hacia aguas abajo.

**3.3.1 Consideraciones de Diseño**

Como en la mayoría de obras de infraestructura el costo total de la obra es un aspecto fundamental por considerar durante su diseño, este concepto está en función de las cantidades de obra, de la disponibilidad de materiales y de la facilidad de transportación de los mismos. A continuación se mencionan los principales factores que deberán ser considerados:

- **Áreas de préstamo**

Por principio de cuentas, el material de cualquier bancos por considerar, debe reunir las características adecuadas para su utilización en la construcción de los bordos. Una vez tomado en cuenta este factor, el siguiente punto por considerar para su elección, es la facilidad de acceso y la distancia al sitio de la obra.

- **Gasto de diseño**

Esta variable es función del periodo de retorno, que depende de la importancia de la obra y los posibles daños en caso de desbordamiento (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1 Periodo de retorno para avenidas de diseño en diferentes obras de protección (Maza, 1997).**

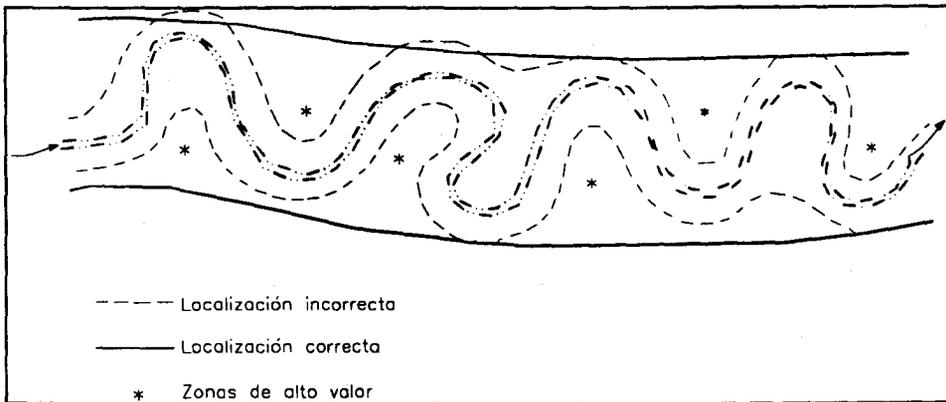
| Tipo de Obra  | Tr (en años) |
|---|--------------|
| Bordos perimetrales, para proteger:                           |              |
| a) Instalaciones industriales                                 | 50 - 100     |
| b) Poblados   | 500 - 1,000  |
| Bordos y muros longitudinales, para proteger:                 |              |
| a) Parcelas agrícolas aisladas sin población                  | 10           |
| b) Distritos de riego, sin riesgo de pérdida de vidas humanas | 25 - 50      |
| c) Zonas agrícolas poco pobladas                              | 25 - 100     |
| d) Zonas agrícolas con poblados                               | 50 - 200     |
| e) Zonas industriales y urbanas                               | 100 - 500    |
| f) Zonas densamente pobladas                                  | 500 - 1,000  |
| g) Ciudades   | 1,000        |

**Tabla 3.1 Periodo de retorno para avenidas de diseño en diferentes obras de protección, (continuación).**

|  |                |
|--|----------------|
| Desvíos, asociados a bordos longitudinales             | 25 - 1,000     |
| Presas de almacenamiento. Obra de excedencias          |                |
| a) Sin pérdida de vidas humanas                        | 500 - 1,000    |
| b) Pocas pérdidas humanas                              | 1,000 - 10,000 |
| c) Considerables pérdidas humanas                      | 10,000         |
| Presas rompe-picos                                     | 1,000 - 10,000 |
| Presas para retener azolves (según su altura)          | 10 - 1,000     |
| Presas derivadoras (según su altura y daños estimados) | 50 - 1,000     |
| Canalizaciones y entubamientos                         |                |
| a) En poblaciones pequeñas                             | 50 - 100       |
| b) En poblaciones medianas                             | 100 - 500      |
| c) En poblaciones grandes y ciudades                   | 500 - 1,000    |
| Puentes carreteros                                     |                |
| a) Caminos locales                                     | 25 - 50        |
| b) Carreteras con tráfico constante                    | 50 - 200       |
| c) Carreteras con tráfico intenso                      | 200 - 1,000    |
| Puentes de ferrocarril                                 |                |
| a) Vías secundarias                                    | 50 - 200       |
| b) Vías principales                                    | 200 - 1,000    |
| Vados (según su importancia)                           | 10 - 100       |

• **Separación entre bordos**

Los bordos longitudinales se ubicarán, en planta, a lo largo de las márgenes procurando ser paralelos entre sí y estar lo suficientemente separados para lograr la menor altura de los mismos. En caso de encontrar meandros sobre el cauce, todos ellos deberán quedar entre ambos bordos (figura 7).



**Figura 7 Arreglo general utilizando bordos perimetrales (Maza, 1997).**

Durante la etapa de diseño deben estudiarse opciones con diferentes separaciones (resultando distintas alturas de bordo) para que al comparar el costo total de las obras contra los beneficios de cada propuesta se cuente con los elementos suficientes para realizar la selección más adecuada (mayor separación implica menor altura y viceversa; sin embargo, una mayor separación implica mayores indemnizaciones).

- **Longitud de los bordos**

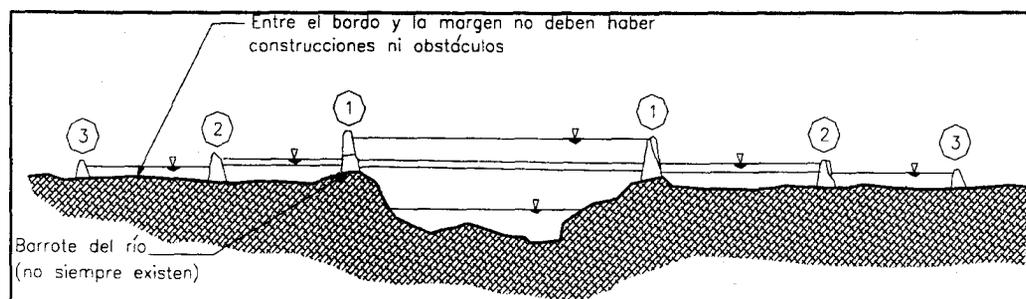
Cuando la longitud del bordo es considerable, conforme la corriente escurre a lo largo de su recorrido se incorporan afluentes, por lo que posiblemente sea necesario aumentar la altura de los bordos conforme se avance hacia aguas abajo, no obstante en la mayoría de los casos la altura se mantiene casi constante sobre la planicie. Por otra parte, cualquier error del proyecto (diseño, construcción, operación, etc.) causará afectaciones, sobre todo en el tramo ubicado inmediatamente aguas abajo del término de la protección, por lo que las zonas que antes no tenían problemas de inundaciones podrían verse afectadas. En el caso cuando sólo se protege una margen, los daños no son tan notables ya que la zona del lado sin protección seguirá inundándose, pero con niveles mayores, por lo que será necesario revisar la posible inundación de nuevas zonas.

- **Rugosidad del cauce**

Este parámetro influye en gran medida en el cálculo de la altura de los bordos, ya que de acuerdo con la teoría de flujo uniforme (por ejemplo, el método de Manning), la velocidad media es inversamente proporcional a este parámetro. Cuando el río lleva agua todo el año no es posible hacer nada para disminuir la rugosidad, mientras que si no tiene agua durante algunos meses puede removerse la vegetación que crece dentro del cauce, ya que su presencia aumenta la rugosidad, asimismo, debe evitarse la colocación o construcción de obstáculos que dificulten el paso del agua o, en el peor de los casos, si ya existen, tomarlos en cuenta durante la etapa de diseño.

- **Altura de los bordos**

Se ha mencionado que la selección de su altura está en función de un análisis económico (figura 8).



**Figura 8 Selección de la altura de los bordos, en función de su separación (Maza, 1997).**

Una vez definido el trazo inicial deberá obtenerse la elevación del agua antes y después de construir las obras, de acuerdo con las variantes siguientes:

**a) En condiciones naturales (sin bordos)**

Para conocer el nivel del agua en cualquier punto e instante se utilizan modelos físicos o matemáticos, ambos requieren una gran cantidad de información, sobre todo topográfica. Generalmente, al inicio del estudio sólo se conoce la elevación del agua en algunas secciones, por lo que la información debe complementarse con otro tipo de datos (por ejemplo, fotografías aéreas tomadas durante anteriores inundaciones). Todo lo anterior sirve para calibrar el modelo que se utilice.

**b) Con bordo en una sola margen**

Los niveles serán los que se obtengan con cualquiera de los modelos mencionados. A continuación, la elevación de la corona se define adicionando un bordo libre. Una vez obtenido este valor para diferentes avenidas, se comparará con el costo de los daños que dejarán de producirse y se elige la mejor opción.

**c) Con bordos en ambas márgenes**

Su estudio se realiza con cualquiera de los modelos ya mencionados. La rugosidad juega un papel muy importante, debido a la reducción de la planicie de inundación ya que la zona bajo estudio se limita a la comprendida entre ambos bordos.

Una vez definida la elevación máxima alcanzada por el agua, para obtener la altura de diseño de los bordos, se utiliza la siguiente expresión:

$$h_{tot} = y_n + h_0 + B.L.$$

donde

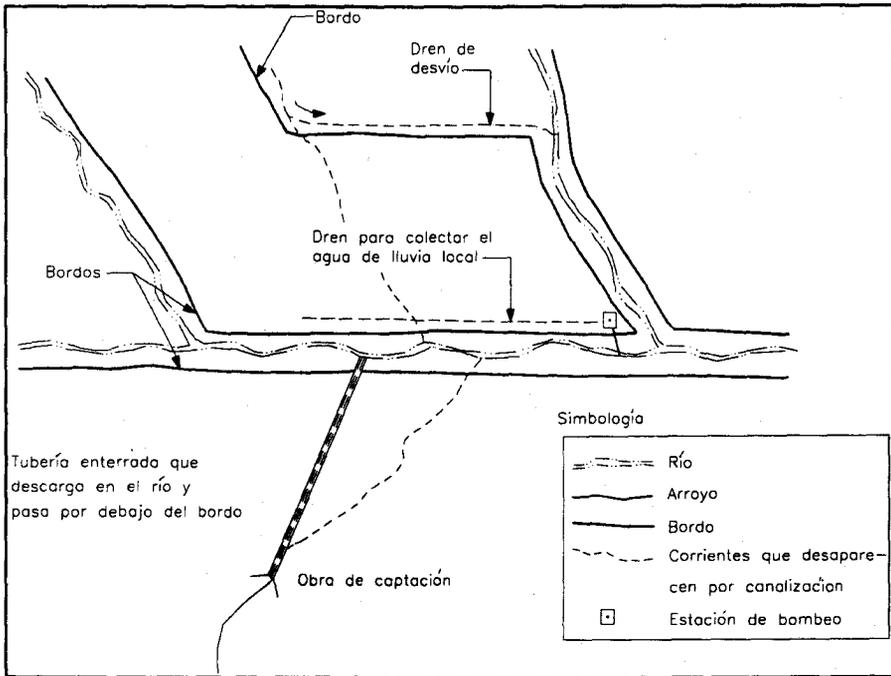
|           |   |
|-----------|---|
| $h_{tot}$ | altura de diseño, m   |
| $y_n$     | altura alcanzada por el agua, m                                   |
| $h_0$     | sobre-elevación por oleaje y rodamiento, m                        |
| $B.L.$    | bordo libre, depende de la importancia de la zona por proteger, m |

• **Drenaje de la planicie**

Así como los bordos evitan el desbordamiento del río al paso de una avenida, también son una frontera que impide que el agua llovida sobre la planicie y sus arroyos retorne al río, por lo que un adecuado proyecto para este tipo de obras debe incluir un drenaje acorde con sus condiciones particulares. El objetivo antes mencionado puede lograrse realizando lo siguiente:

**a) Para afluentes**

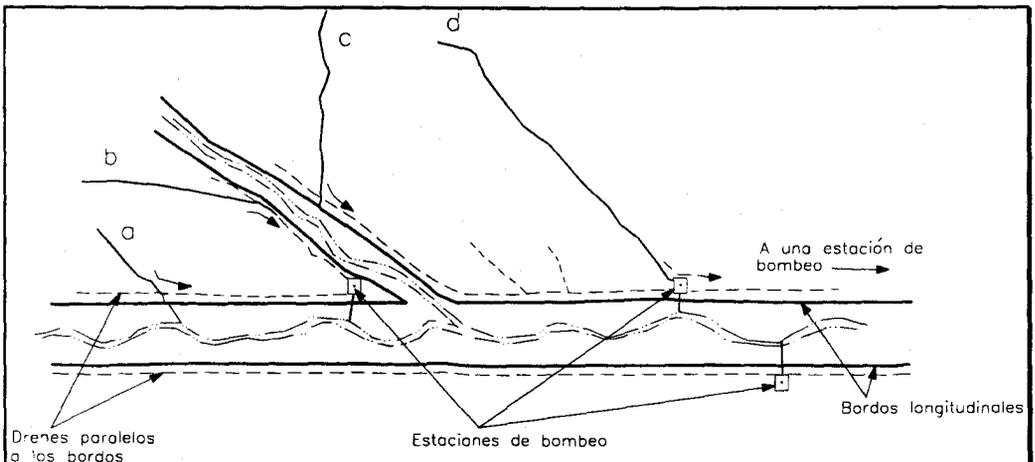
Cuando un bordo pasa por la confluencia de un arroyo y el río principal, es necesario interrumpir su construcción y llevarlo sobre las márgenes del tributario hacia aguas arriba, diseñando esas extensiones del bordo como otro bordo longitudinal (figura 9). En el caso de encontrar afluentes caudalosos, para controlar sus crecidas, se les debe dar el mismo tratamiento que al río principal, esto es, construir presas de almacenamiento u obras de desvío.



**Figura 9 Drenaje de corrientes tributarias (Maza, 1997).**

**b) Para escurrimientos sobre la planicie**

Para captar pequeños escurrimientos, generalmente, se realiza un dren paralelo al bordo cuya capacidad hidráulica depende del gasto en cuestión. Esos drenes pueden terminar en: el cauce principal, una vez que terminan los bordos; una estación de bombeo, que retorna al agua al cauce principal, una sección con compuertas que se cierran cuando el nivel del río es alto y desalojan el volumen captado una vez que pasa la avenida (figura 10).



**Figura 10 Drenaje en planicies, en zonas con bordos (Maza, 1997).**

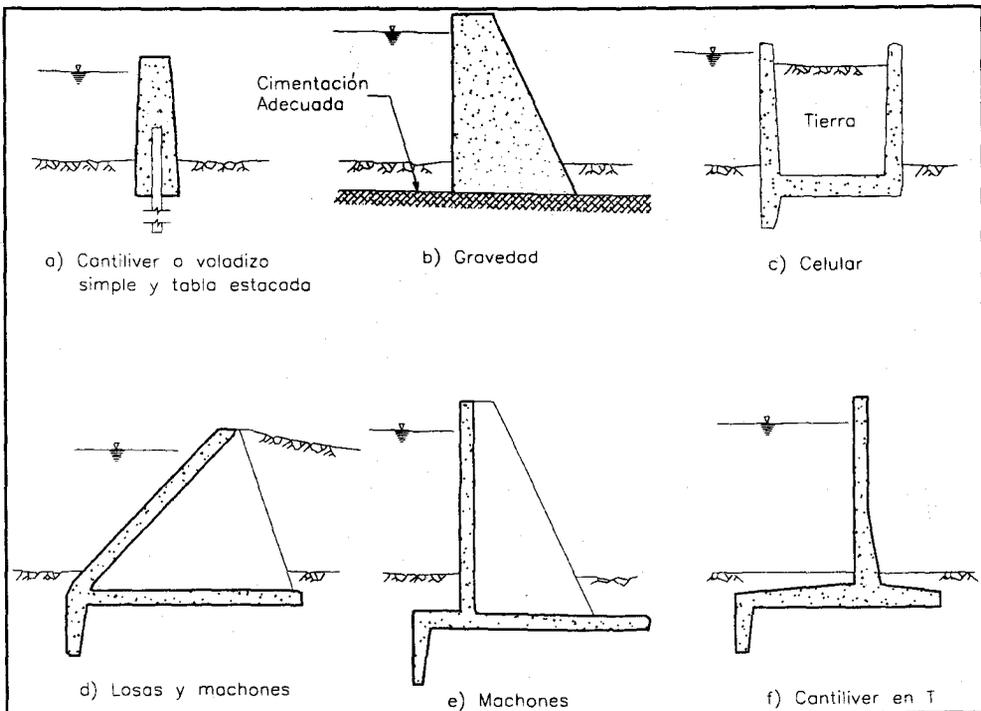
• *Avenidas mayores a la de diseño*

Puesto que el dimensionamiento de estas obras se realiza para un gasto máximo cuya estimación no deja de tener cierto grado de subjetividad (es imposible proteger al 100% la zona de interés ya que resulta excesivamente costoso), se deben establecer los procedimientos a seguir cuando se presente una crecida que sobrepase la de diseño. Más aún, deben identificarse uno o varios tramos del bordo para que en caso necesario el agua vierta sobre ellos e incluso sea relativamente fácil romper el bordo y así el resto de la obra pueda soportar la crecida y sólo se afecten zonas en que las pérdidas sean menos graves, preservando así otras muy pobladas o de alto interés económico.

Por otra parte, al proyectar las estructuras debe tenerse en cuenta la situación siguiente: la gente confía plenamente en que la obra soportará cualquier contingencia, por lo que deja de lado las precauciones mínimas de seguridad; por lo mismo el desarrollo de la zona protegida crecerá y en caso de ocurrir una falla de la estructura, la avenida se presentará con mayor rapidez y alcanzará niveles que ocasionarán daños mayores a los esperados si no se hubiera construido la obra.

**3.4 MUROS DE ENCAUZAMIENTO**

Están constituidos por paredes prácticamente verticales (figura 11).



**Figura 11 Tipo de muros de encauzamiento (Maza, 1997).**

Desde el punto de vista de diseño y operación son muy parecidos a los longitudinales, se utilizan principalmente en zonas bajas (las obras para protección de las márgenes son otro de sus campos de aplicación). Durante el diseño, se debe tomar en cuenta que el cauce principal estará ubicado entre ellos (los muros), dejando una planicie de inundación no apta para asentamientos urbanos ni industriales.

Se utilizan, principalmente, cuando los taludes de los bordos resultan muy tendidos y por tanto el volumen de obra es muy grande, o bien al cruzar zonas urbanas o terrenos muy costosos donde no hay espacio suficiente para construirlos.

Estas estructuras pueden construirse a base de concreto en masa o armado, gaviones o mampostería.

### 3.4.1 Consideraciones de Diseño

Como se menciona en párrafos anteriores, son estructuras que trabajan de manera similar a los bordos, por lo que el diseño también sigue los lineamientos generales de ese tipo de obras, a saber:

- **Gasto de diseño.** Al igual que en el caso anterior, depende de la zona por proteger.
- **Estructura.** El diseño debe considerar la presión hidrostática, incluyendo la subpresión esperada con el nivel del agua alcanzado cuando se presente la avenida máxima.
- **Drenaje.** Deberá proveerse de un sistema de drenaje adecuado para la zona protegida.
- **Altura.** La variable principal a considerar para este aspecto es el gasto de diseño, ya que en función de éste, se alcanzarán diferentes elevaciones.

Aún y cuando su diseño es muy parecido al de los bordos, cabe mencionar que pese a que los muros requieren de un espacio menor que los bordos, y por tanto menor volumen de obra, su costo puede ser mucho mayor que el de aquéllos.

## 3.5 CAUCES DE ALIVIO

Su principal función es desviar mediante un canal hacia el mar, una laguna, otro cauce o alguna zona previamente definida parte del volumen de agua que escurre sobre el cauce principal (figura 12), reduciendo la magnitud del hidrograma de la avenida y, al mismo tiempo, la altura de los bordos o muros de encauzamiento localizados aguas abajo del sitio donde se ubica dicho desvío también se reduce. A este tipo de obras también se les conoce con el nombre de desvíos permanentes.

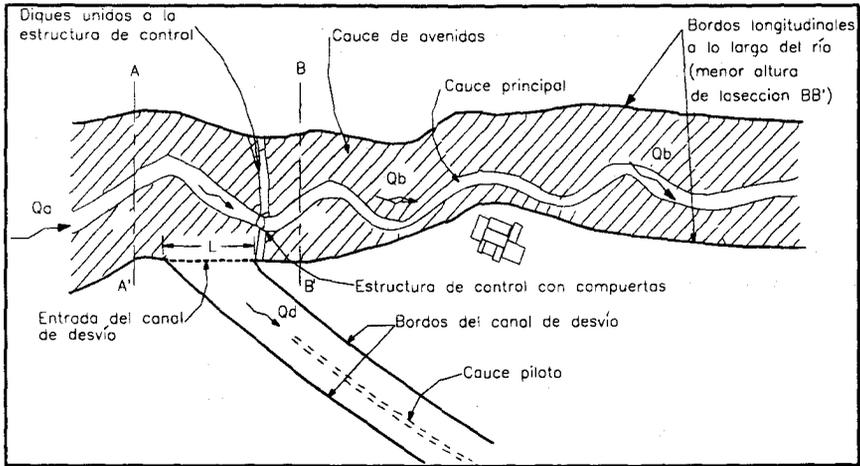


Figura 12 Arreglo general de un cauce de alivio (Maza, 1997).

### 3.5.1 Consideraciones de Diseño

La principal variable por considerar para su diseño es la selección del sitio donde se almacenará el volumen desviado, sin olvidar algunos otros puntos, tales como:

- **Formación sobre la planicie.** Normalmente se delimitan con bordos longitudinales, el terreno natural de la planicie forma el fondo del desvío y sólo se excava un pequeño cauce piloto, cuyo material se utiliza para construir los bordos mencionados.
- **Construcción del cauce de alivio.** Siempre que sea posible, conviene excavar sólo un pequeño cauce piloto para que el flujo escurra por y hacia donde se desea (labrando su propio cauce); sin embargo, en ocasiones se debe excavar éste casi por completo lo que representa una solución demasiado costosa.
- **Entrada del cauce de alivio.** Su elevación es similar a la del terreno natural, para que al subir el nivel del agua e inicie el escurrimiento sobre la planicie de inundación, parte de esa agua sea desviada y aguas abajo, en el cauce principal, se reduzca el gasto.
- **Ancho del desvío (separación de los bordos).** Como en los casos anteriores, la altura de los bordos está en función de este parámetro, pero debe tomarse en cuenta que para el gasto de diseño, el caudal “ya disminuido” produzca una elevación que requiera bordos más pequeños.
- **Cálculo.** El diseño de los bordos es similar al descrito en el inciso 3.2 (bordos longitudinales), además de seguir los lineamientos generales definidos en el punto 3.1 (bordos) de este mismo capítulo.
- **Estructuras de control.** Cuando se desea limitar el escurrimiento hacia aguas abajo, es factible definir algún arreglo (por ejemplo, a base de compuertas) que permita regular el paso del volumen deseado.

### 3.6 DESVÍOS TEMPORALES

El proyecto de estas obras obedece a la existencia de zonas bajas, lagunas o depósitos artificiales que puedan ser inundados momentáneamente, mientras se presenta la avenida (figura 13). Debido a que las zonas afectadas fueron elegidas de antemano para ese fin, los daños ocasionados son pequeños.

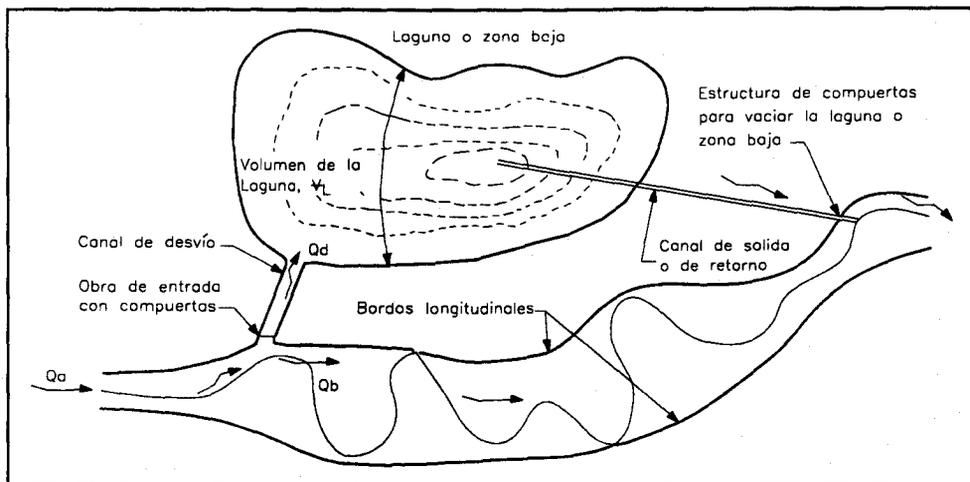


Figura 13 Arreglo general para un desvío temporal (Maza, 1997).

La principal diferencia con respecto a un desvío permanente es que mientras éste puede desviar volúmenes muy grandes, los temporales sólo están en posibilidad de desviar un volumen prefijado (que corresponde al de la zona o depósito artificial seleccionado para tal fin). Otra diferencia es que al descender los niveles del río, el agua desviada retorna a él.

#### 3.6.1 Consideraciones de Diseño

- **Gasto de diseño.** Conviene que el gasto máximo para el diseño de las obras aguas abajo del desvío corresponda con el mostrado en la figura 14, es decir, que durante el diseño del desvío así como el de los bordos no se olvide la interacción volumen desviado - gasto máximo.

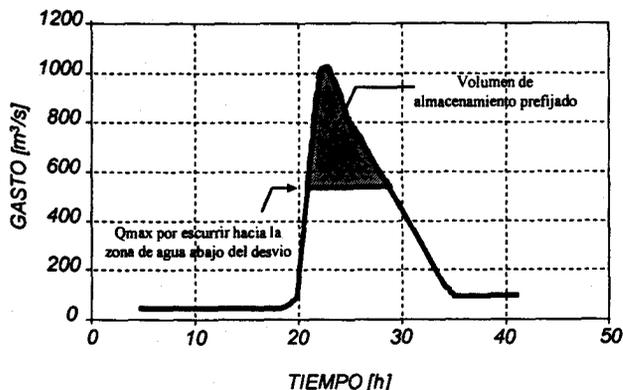


Figura 14 Dimensionamiento de un desvío temporal

- **Canal de desvío.** La conducción entre el río y la zona por inundar puede ser semejante a uno de alivio; su capacidad de conducción está en función del desnivel entre la zona inundada y el río, mientras que la sección transversal depende del tiempo disponible para llenar la laguna.
- **Estructura de control.** Se debe contar con una estructura de este tipo, que permita controlar el flujo de agua en ambas direcciones (del río al depósito y viceversa).
- **Canal de retorno.** No tiene razón de ser cuando sólo ocurre una avenida al año, o bien la infiltración y evaporación permiten contar con el tiempo suficiente para el vaciado.
- **Obras auxiliares.** Son un buen complemento cuando se utilizan bordos longitudinales ya que el dimensionamiento de éstos se realiza con caudales menores.
- **Depósitos artificiales.** Su utilización debe limitarse para pequeñas corrientes con avenidas poco voluminosas, en caso contrario, los volúmenes para almacenamiento requeridos se incrementan notablemente.

### 3.7 CORTE DE MEANDROS

Una opción más para reducir las inundaciones, consiste en rectificar el río (figura 15), con lo que se aumenta la capacidad hidráulica del cauce. El efecto de esta solución es evidente sólo a lo largo de la rectificación y en el tramo inmediatamente aguas arriba de ella.

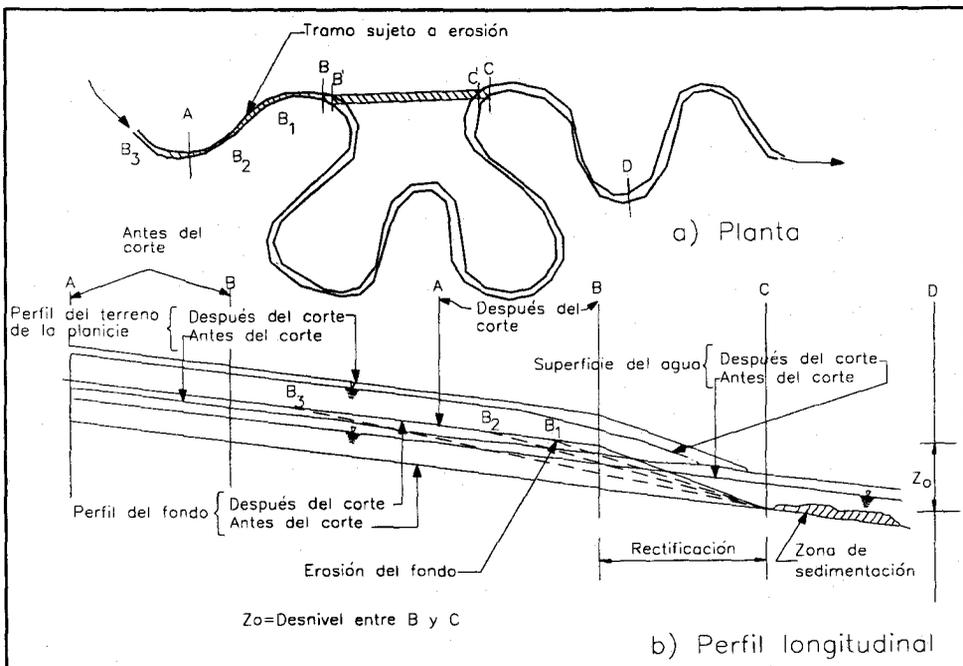


Figura 15 Corte de un meandro y sus consecuencias (Maza, 1997).

### 3.7.1 Consideraciones Generales

Cuando un río presenta meandros, lo que se persigue al rectificarlo es incrementar su capacidad hidráulica, aumentando la pendiente por medio del corte de una o varias de sus curvas.

Lo más importante es recordar que en el río existe una relación de equilibrio entre los gastos sólido y líquido que pasan por un determinado tramo, las dimensiones de la sección transversal del cauce, la pendiente hidráulica en el mismo y las propiedades físicas del material que forma su fondo y orillas. Por lo que al cortar un meandro se rompe ese equilibrio y el río tiende a estabilizarlas nuevamente. Para recuperarlas, tiende el río a suavizar la pendiente desarrollando nuevos meandros. Así pues, para que las obras sean efectivas se deben proteger los márgenes del río (por ejemplo, con espigones o recubrimientos marginales) si no, la corriente volverá a formar nuevos meandros.

Debido a la alteración de sus condiciones de equilibrio, la inestabilidad de la corriente provoca una erosión en el extremo de aguas arriba de la rectificación (el río trata de suavizar su pendiente) y como consecuencia aumenta el área hidráulica que a su vez aumenta la capacidad hidráulica. Por lo anteriormente descrito, es factible aprovechar el corte de meandros como obra de protección contra inundaciones.

El principal inconveniente de esta solución es que las máximas velocidades ocurren precisamente dentro de la rectificación, por lo que el material erosionado tiende a depositarse inmediatamente aguas abajo del tramo rectificado, lo que disminuye la capacidad hidráulica al final de la rectificación. La única forma de evitarlo es dragar el tramo donde ocurren los depósitos, tratando de mantener las condiciones anteriores a la obra.

Al diseñar este tipo de obras en un cauce de tipo arenoso, se debe tener en cuenta que la ampliación del cauce piloto se produce hacia los márgenes, lo que implica un ensanchamiento de las secciones, por lo que el radio hidráulico aumenta y esto origina un incremento de la velocidad media que a su vez genera un mayor transporte de sedimentos. Lo anterior sucede mientras el gasto desviado es menor al del río. A medida que el caudal que pasa por el corte tiende a ser igual al del río, se reduce el proceso erosivo.

En caso de contar con material más resistente por tener mayor tamaño, pero sobre todo por tener cohesión (por ejemplo, suelos de tipo arcilloso) se debe excavar una sección más ancha, de manera que el flujo alcance velocidades capaces de erosionar la sección, en caso de no ocurrir lo anterior, la sección de la rectificación deberá ser casi igual a la del ancho del río.

### 3.7.2 Consideraciones de Diseño

Entre otras cosas, conviene recordar que, debido al elevado costo este tipo de obra, se recomienda utilizarlas sólo cuando se tienen poblaciones importantes, ya que además de realizar la rectificación, será necesario proteger los márgenes aguas arriba del corte y dragar la zona aguas abajo de las obras.

- **Cauce piloto.** La construcción de la rectificación comprende la excavación de un cauce piloto, que será ampliado con el paso de los volúmenes de agua desviados. Sus dimensiones dependerán de la pendiente del mismo y de los materiales que lo forman. Además, durante el funcionamiento del corte, se cumple la condición siguiente:

$$\frac{Q_r}{Q_c} + \frac{Q_r}{Q_m} = 1$$

donde

- $Q_r$  gasto que transporta el río, m<sup>3</sup>/s
- $Q_c$  gasto desviado por el canal rectificado, m<sup>3</sup>/s
- $Q_m$  gasto que escurre por el meandro, m<sup>3</sup>/s

Al paso del tiempo, el primer término aumentará y el segundo tenderá a disminuir apreciablemente.

- **Plantilla del cauce piloto.** Se debe excavar hasta alcanzar el fondo del río, tanto aguas arriba como abajo, y será uniforme en toda su longitud.
- **Ancho mínimo.** Para evitar que se cierre, debido a algún caído, deberá ser al menos igual a dos veces la distancia entre el fondo del cauce piloto y el nivel del terreno. Al mismo tiempo, deberá garantizar el arrastre de las partículas del fondo (esfuerzo cortante crítico).

$$B_{min} = 2 (\text{nivel del terreno} - \text{nivel del fondo})$$

$$\tau_0 \geq 3\tau_c$$

donde

- $t_0$  esfuerzo cortante, kg/cm<sup>2</sup>
- $t_c$  esfuerzo crítico, kg/cm<sup>2</sup>

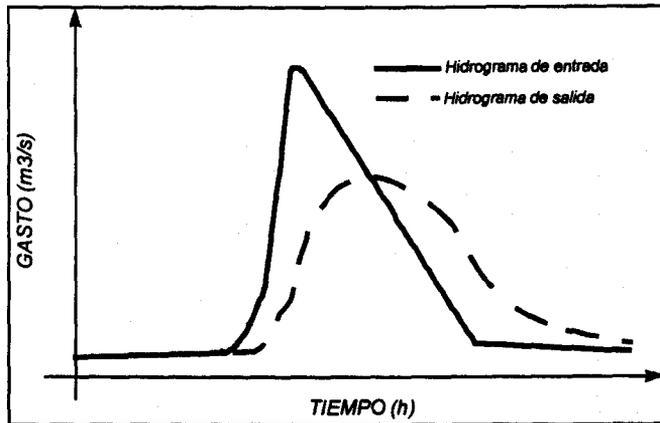
- **Dragado.** Se debe tomar en cuenta que debido al depósito generado aguas abajo del tramo rectificado, es necesario realizar trabajos de dragado, a fin de evitar remansos que afecten el funcionamiento hidráulico de la obra. Sin embargo, se deberá tener en mente que cuando se trate de corrientes con material muy fino, no será necesario dragar.

### 3.8 PRESAS DE ALMACENAMIENTO

Una forma de hacer frente al problema de las inundaciones es modificando el hidrograma de la avenida, disminuyendo el gasto máximo que deberá conducir la corriente; la forma más efectiva y por tanto más utilizada a nivel general, consiste en atenuar el pico de la avenida y defasarlo en el tiempo (figura 16). Este fenómeno se conoce como *regulación*.

Con la idea anterior (disminuir el tamaño de la avenida, almacenando parte de la misma en un embalse), es posible conseguir propósitos adicionales como: generación de energía eléctrica, riego, abastecimiento de agua potable, etc. Al tener en cuenta el control de inundaciones y al mismo tiempo el uso del agua para los fines señalados, el resultado es un conflicto de intereses

ya que cuanto más vacío se encuentre el embalse se dispone de una mayor capacidad para el control de las avenidas, pero conviene guardar en el embalse el mayor volumen de agua para utilizarlo posteriormente de acuerdo con los usos señalados.



**Figura 16 Presa de almacenamiento. Regulación**

La consecuencia inmediata a lo anterior resulta ser un problema de optimización ya que es necesario maximizar los aprovechamientos minimizando los posibles daños provocados por las crecientes generadas aguas abajo de la presa al operar la obra de excedencias.

### 3.8.1 Consideraciones de Diseño

Los factores que deben tomarse en cuenta para el diseño de la obra (Torres H., 1980) se pueden englobar dentro de los siguientes:

a) **Condiciones del sitio.** Se refieren a las características físicas del lugar donde se ubica la obra, pueden subdividirse en:

- **Condiciones geológicas**

Por las dimensiones mismas del proyecto, en este tipo de obras se trata con masas de roca fracturada, fallas o formaciones con diferentes grados de intemperismo y gran heterogeneidad en sus propiedades físicas. Con los estudios geológicos es posible determinar el posible comportamiento de las estructuras que conforman todo el proyecto, identificando problemas relacionados con la cimentación de las estructuras, inducidos por la existencia de fallas geológicas o la presencia de material de mala calidad con el que se interaccione y así estar en posibilidad de cuantificar posibles variantes del proyecto.

Puesto que la transmisión de esfuerzos a la cimentación y las laderas, así como la capacidad de éstas son resultados básicos de un estudio geológico, la cortina es una estructura definida prácticamente por este tipo de estudios. En general, se puede decir que una cortina de arco requerirá una mejor calidad de terreno que una de contrafuertes,

a su vez ésta requiere mejores condiciones que una de gravedad y esta última que una de tierra, debido en parte, a que la primera tiene una menor área de apoyo.

La dirección de los echados (sentido de las capas de roca) también es determinante para efectos de selección.

• **Condiciones topográficas**

Conocer la morfología de la cuenca de captación, permiten saber cuál será la capacidad de almacenamiento del vaso para diferentes alturas de presa, así como seleccionar uno o varios ejes de la presa para valuar los volúmenes de la misma.

Seleccionada la boquilla, se recurre a los planos topográficos de la zona, a fin de elaborar la curva E-A-V, que indica el volumen almacenado por la presa a diferentes alturas y posibilita el desarrollo de los correspondientes estudios hidrológicos, como son:

- Funcionamiento del vaso
- Tránsito de avenidas

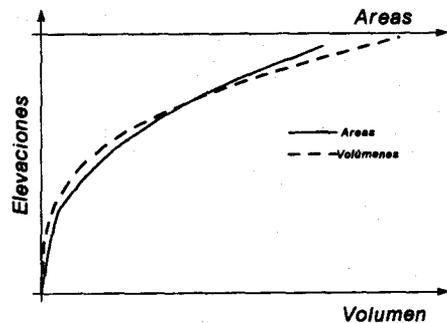


Figura 17 Curva E - A - V

En cuanto a la morfología, las curvas indican si el vaso es estrecho o amplio; mientras que junto con los estudios hidrológicos se define la altura de la cortina y la capacidad de regulación.

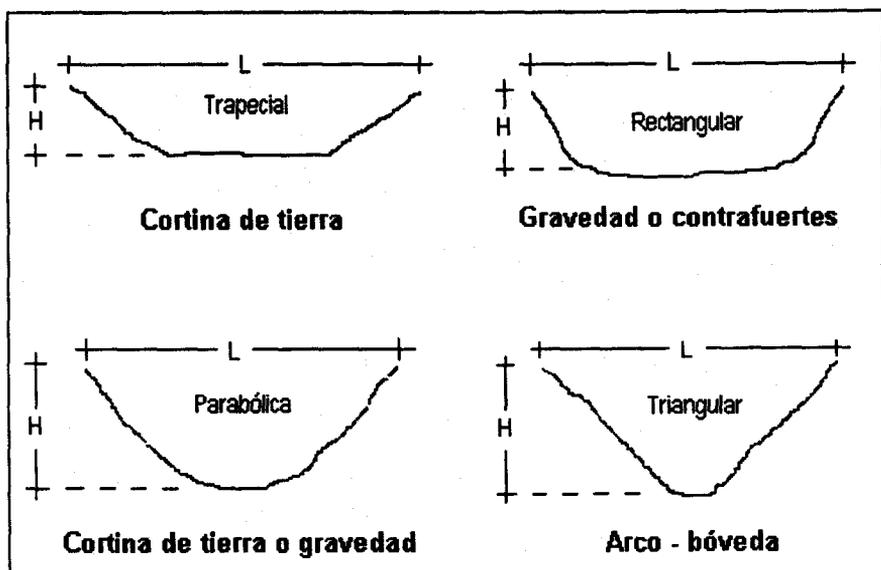


Figura 18 Tipos de cortina en función de la morfología de la boquilla (Torres, 1980).

Independientemente de la forma de la boquilla, es posible referirse a una boquilla como “ancha” o “angosta” tomando en consideración su longitud (L) y su altura (H), esto es:

|            |                               |
|------------|-------------------------------|
| $L/H > 10$ | se considera boquilla ancha   |
| $L/H < 5$  | se considera boquilla angosta |

- **Materiales de construcción**

La información de los bancos de materiales, ya sea agregados para concreto o tierra y roca, se deben obtener de investigaciones previas (dentro de los reconocimientos geológicos) y ponerlos a disposición del proyectista, indicando su localización y describiendo con detalle los materiales que se propone usar.

La influencia de la disponibilidad de materiales de construcción adecuados, de acuerdo con el tipo de cortina (ya sea de concreto o de materiales sueltos), es fundamental para el diseño, por lo que una vez localizados los bancos y otras posibles fuentes de materiales debe realizarse un estudio económico comparativo donde se consideren distancias de acarreo y costos de obtención (compra o extracción y proceso de los materiales) y seleccionar la opción de costo mínimo, en función del costo de éstos puestos al pie de la obra. Otro aspecto importante a considerar, es la factibilidad de obtener mano de obra en la región de construcción.

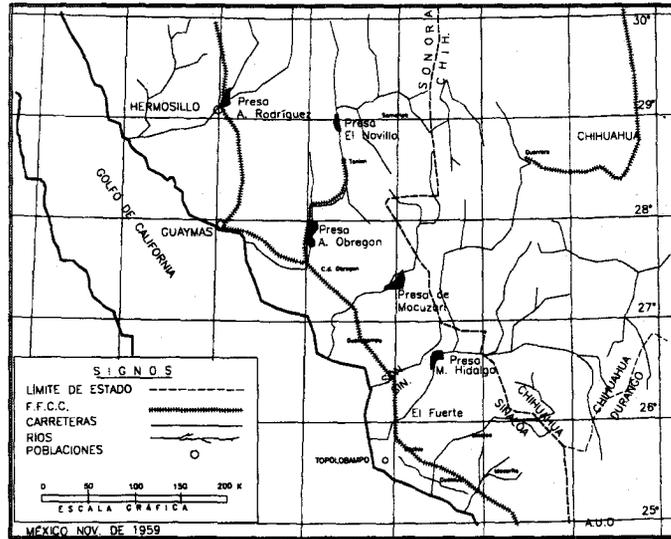
- b) **Factores hidráulicos.** Posterior al dictamen de los estudios geológicos, el siguiente en importancia para definir los alcances de la obra es el correspondiente a la ingeniería hidráulica.

Dentro de la información hidrológica e hidráulica que tiene influencia directa en la concepción del proyecto, entre la de mayor importancia se cuentan: los escurrimientos medios de la corriente que definen la capacidad de almacenamiento necesaria del embalse que, al mismo tiempo, sirve para obtener la altura necesaria de la cortina; los escurrimientos máximos asociados a diferentes periodos de retorno, que definen las avenidas de diseño que son la base del proyecto para las obras de desvío, excedencias, desagüe de fondo, etc.

Con frecuencia, y desde el punto de vista económico, la obra de excedencias es la estructura más importante para determinar el tipo y la altura de la cortina, siguiendo en orden: la de desvío y la de toma.

- c) **Condiciones de tránsito.** Debido a que las presas inundan tramos de carreteras y caminos localizados dentro de lo que será el vaso de almacenamiento, es indispensable llevar a cabo una relocalización de los mismos; en éste caso la corona de la cortina puede representar una buena solución para el cruce del río.

Directa o indirectamente la mayoría de las presas protegen poblaciones o zonas de interés localizadas aguas abajo del sitio de la obra (figura 19). Para este segundo fin, el resultado será mejor cuanto menor sea la relación entre el volumen de la avenida y el de regulación en el vaso, lo que implica que el gasto descargado por la obras de excedencias será menor.



**Figura 19 Presa de almacenamiento. Ubicación**

Es importante aclarar que ante la necesidad de descargar a través de la obra de excedencias, la avenida que se produce aguas abajo del embalse siempre es menor que la producida si la presa no existiera, representando un beneficio poco conocido o poco entendido por las personas ajenas a la problemática (cada vez que se genera una avenida aguas abajo de una presa, es común culpar a las autoridades que operan la obra sin considerar que es una acción necesaria para mantener la seguridad de la cortina y de almacenamiento).

**3.9 PRESAS ROMPE-PICOS**

El objetivo de este tipo de estructura es regular las avenidas que se generen a lo largo del cauce sobre el que están construidas. Normalmente, se emplean en corrientes pequeñas y su principal característica es la poca altura de su cortina y, consecuentemente, su reducida capacidad de almacenamiento.

De acuerdo con las características antes mencionadas, la ventaja más clara estriba en los costos relativamente bajos, haciendo factible la proyección de sistemas en cascada (cuando la capacidad de regulación necesaria sea relativamente grande y se advierta la necesidad de construir dos o más presas, o bien, cuando la topografía de la zona en cuestión sea demasiado plana y sea inevitable utilizar varias estructuras); sin embargo, el control de la crecida se lleva a cabo reteniendo por corto tiempo los volúmenes embalsados sin posibilitar el aprovechamiento de los mismos, siendo éste quizá su mayor inconveniente (figura 20).

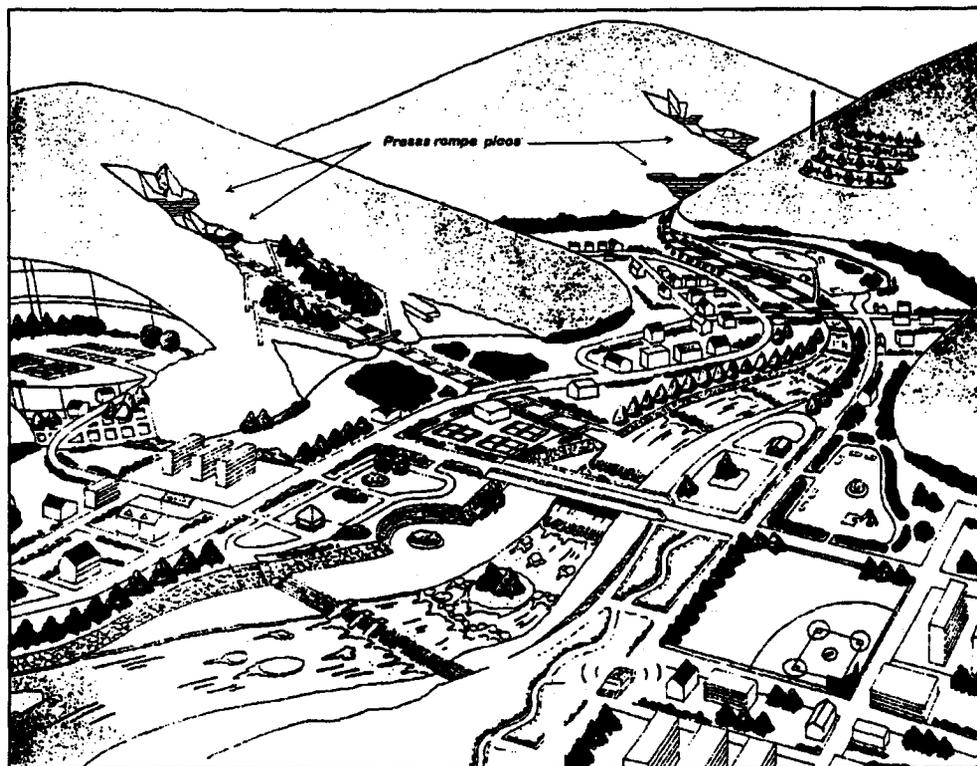
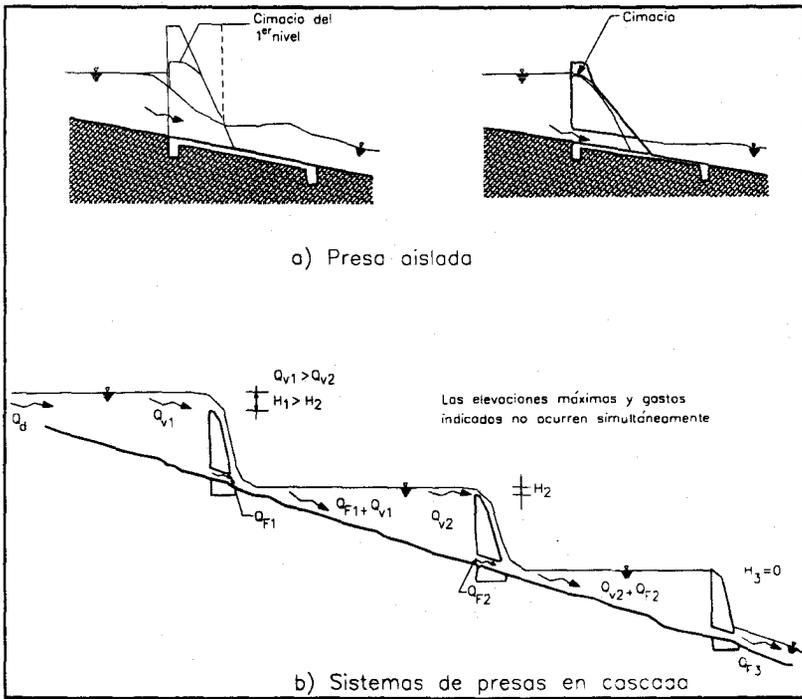


Figura 20 Disposición de presas rompe-picos (Japan's Ministry of Construction, 1992) .

### 3.9.1 Consideraciones de Diseño

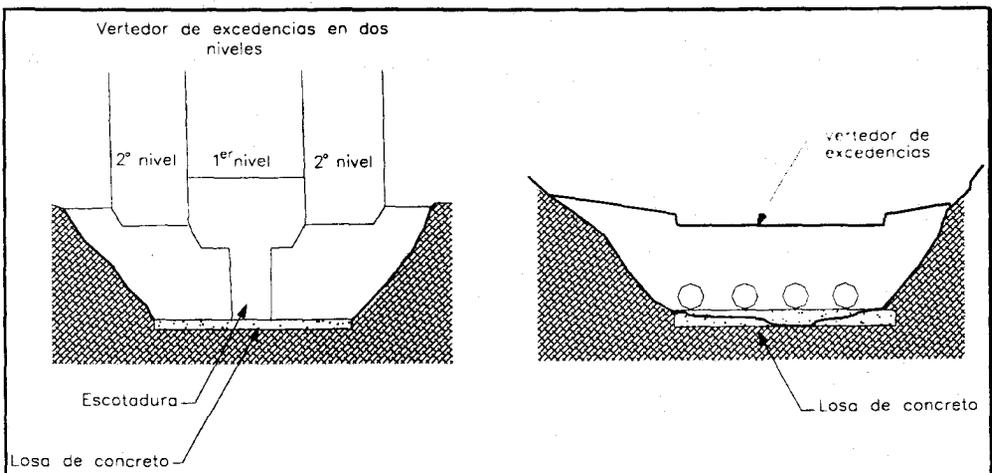
A continuación se mencionan algunos de los aspectos más importantes que deben ser considerados al momento de diseñar las diferentes partes integrantes de estas estructuras.

- **Cortina.** Generalmente, funciona como cortina vertedora, por lo que debe ser de concreto o mampostería, su diseño sigue las especificaciones tradicionales de estabilidad de una cortina convencional y su altura está en función de la avenida de diseño y de la topografía (que define la capacidad del embalse). Si por condiciones topográficas no es posible la construcción de una presa para regular las avenidas esperadas, será necesario pensar en dos o más, cuya capacidad cumpla las condiciones requeridas (figura 21).
- **Cimentación.** Al igual que en cualquier cortina convencional, las condiciones geológicas marcan la pauta respecto a la construcción de la estructura, por lo que su desplante deberá realizarse preferentemente en roca; en caso adverso, será necesario re - localizar el sitio del proyecto.



**Figura 21 Alternativas para el arreglo de presas rompe-picos (Maza, 1997).**

- **Vertedor.** Puede colocarse en la parte baja de la cortina (como conductos), en la parte superior como vertedor o diseñarse una combinación de ambas (figura 22). En cualquier caso se diseña para desalojar la avenida máxima esperada. Ahora bien, en el caso de que se presente una avenida mayor que la esperada, en general, esto no tiene mucha importancia ya que los materiales mismo con los que está construida la cortina, permiten el paso del agua por encima del cuerpo de la misma sin causar daños de consideración.



**Figura 22 Alternativas para la obra de excedencias de presas rompe-picos (Maza, 1997).**

Una desventaja de este tipo de estructura es el probable incremento del hidrograma de la avenida, aguas abajo del sitio de la obra, aunque es difícil, no debe descartarse que se presenta esta condición; la mayor amplificación del hidrograma sucede cuando coinciden el gasto máximo de la avenida regulada por la presa y el de la avenida que escurre por algún afluente.

### 3.10 PRESAS RETENEDORAS DE AZOLVES

Su función consiste en “atrapar” la mayor cantidad de sedimentos procedentes de la parte alto de la cuenca (figura 20). Generalmente son presas de poca altura, cuyo volumen de almacenamiento es reducido y aunque en poco tiempo se colmatan, su efecto es positivo debido a que disminuyen la pendiente del fondo del cauce y con ello, su capacidad de arrastre de sedimentos.

#### 3.10.1 Consideraciones Generales

Es recomendable que al seleccionar el periodo de retorno de la avenida para diseñar este tipo de obras se considere la aportación de sedimentos de la cuenca tributaria, con la finalidad de conseguir un buen funcionamiento durante la vida útil de la obra (comúnmente el  $Tr \geq 50$  años) y no se presenten problemas relacionados con una disminución significativa en la capacidad estimada durante la etapa de proyecto.

Debido a que son estructuras relativamente bajas, pueden diseñarse considerando descargas por encima del cuerpo de la cortina, por lo que ésta debe ser de concreto, o bien, formarse a base de gaviones (figura 23).

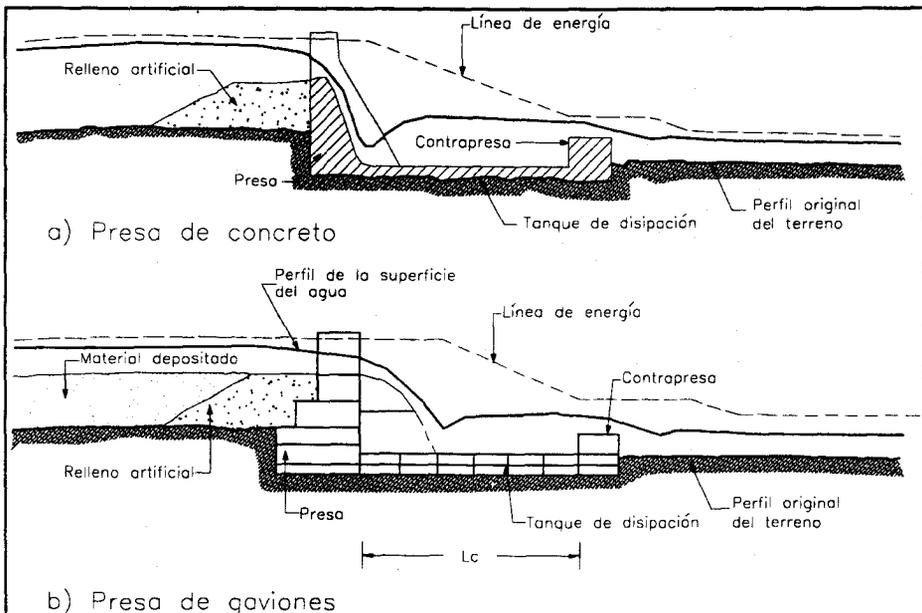


Figura 23 Esquema de una presa retenedora de azolves (Maza, 1997).

El principal punto sobre el que se debe reflexionar durante el diseño de las estructuras es que el hidrograma de la avenida no se modifica debido a que prácticamente es nula la capacidad de regulación del embalse, y en ocasiones (cuando el cuerpo de la cortina es permeable) el agua pasa a través de ellas, y únicamente retiene partículas del suelo erosionado, reduciendo el transporte de sedimentos así como la concentración de sedimentos de las descargas que realiza la presa, evitando que los tramos aguas abajo se azolven.

Una acción que aumenta la vida útil de la obra es la reforestación de la cuenca tributaria ya que disminuye la aportación de sedimentos (como se verá en el punto 3.12).

### 3.11 CANALIZACIÓN O ENTUBAMIENTO DE UN CAUCE

El objetivo es desalojar rápidamente los volúmenes que escurren en un cauce confinándolos en secciones menores a las naturales mediante muros (canal) o tubos, tratando de reducir las inundaciones o para aprovechar los terrenos aledaños.

La canalización de un cauce consiste en revestir tanto el fondo como los márgenes, construyendo puentes y alcantarillas en los cruces de la corriente con vías de comunicación o tuberías (figura 24).

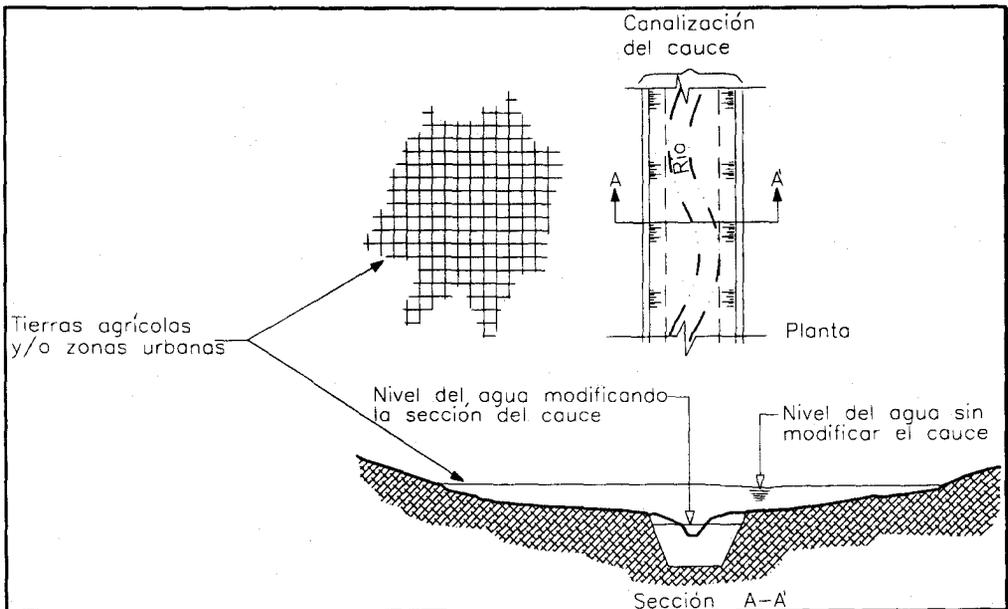


Figura 24 Canalización de un cauce (Maza, 1997).

Normalmente, al entubar un cauce los ductos quedan debajo del terreno natural por lo que al poner en práctica esta alternativa la superficie que queda por encima de la obra se puede destinar para otros usos (figura 25).

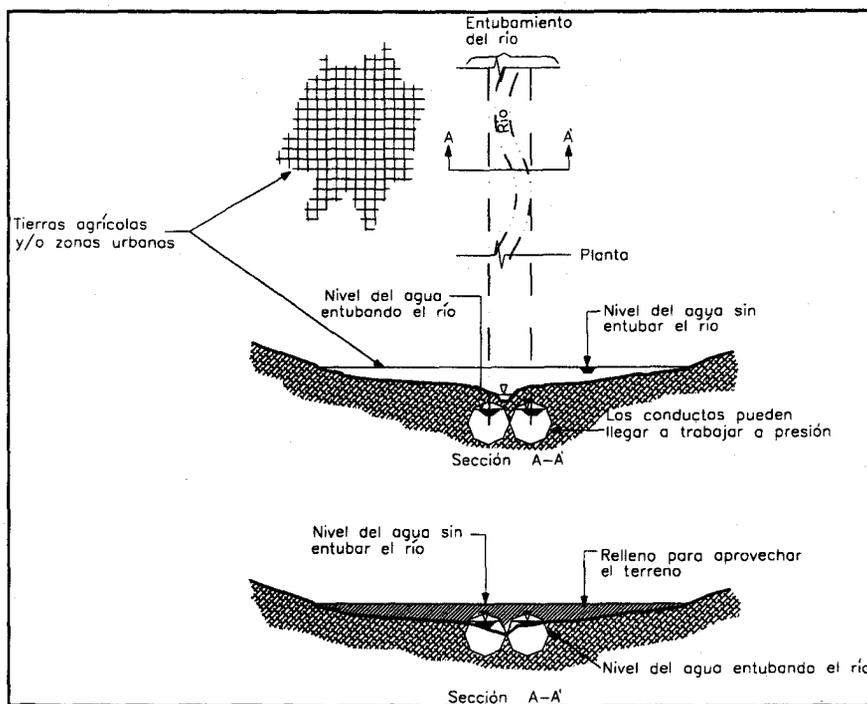


Figura 25 Entubamiento de un cauce (Maza, 1997).

### 3.11.1 Consideraciones Generales

Se recomienda que el periodo de retorno con el que se diseñe este tipo de obras sea mayor de 50 años.

Con el propósito de evitar sobre - elevaciones del nivel de agua al inicio o al final de la canalización, se deben considerar transiciones tanto a la entrada como a la salida de la obra.

Desde el punto de vista económico, para amortizar el costo de las obras, se puede considerar que la canalización o el entubamiento de alguna corriente, dentro de una zona habitada, incrementa el valor comercial de los terrenos aledaños debido a que con la venta de esos terrenos es posible absorber parte del costo de las obras mencionadas.

### 3.12 REFORESTACIÓN DE LA CUENCA

La pérdida o destrucción de la vegetación y cobertura vegetal de una cuenca ocasiona una serie de alteraciones en perjuicio de las comunidades asentadas aguas abajo de dichas zonas, debido a que las variables que controlan la relación lluvia-escorrentamiento (transformación del volumen que llueve en gastos que escurren a través de las corrientes) experimentan un efecto amplificador (se infiltra o retiene menos agua, generando mayores caudales que se presentan en periodos de tiempo más cortos). Entre otros, los efectos más acusados son:

#### *a) Tiempo de concentración*

El tiempo de respuesta de la cuenca se reduce, es decir, la rapidez con la que se presenta una avenida en algún punto de interés es mayor, dura menos tiempo, pero los gastos máximos aumentan.

#### *b) Infiltración*

Este parámetro disminuye, sobre todo si la pendiente del terreno es alta, por lo que el volumen que escurre es mayor, con lo que la avenida que se traslada hacia aguas abajo aumenta.

#### *c) Sedimentos*

La cantidad de material arrastrado por la corriente se incrementa considerablemente, si la capacidad de arrastre en los cauces no es suficiente para transportarlo (al material arrastrado) éstos se azolvan y se pierde capacidad hidráulica.

Para lograr una mejor regulación (hidrogramas con mayor duración y menor gasto de pico) se debe evitar la destrucción de la cobertura vegetal de la cuenca tributaria o reforestarla (figura 20).

## **CAPÍTULO 4**

### **CRITERIOS DE RIESGO**

La confiabilidad es una medida de qué tan seguro es un sistema (obras de protección contra inundaciones, una hidroeléctrica, un sistema para abastecimiento de agua, etc.) para satisfacer los requerimientos para lo que fue establecido. Se puede expresar en función de diversos parámetros: grado de protección (en el caso de obras de protección), generación firme (para el caso de la hidroeléctrica), probabilidad de satisfacer las demandas durante un intervalo de tiempo específico (cuando se trata de abastecimiento), etc. Por su parte, el riesgo es una medida de la probabilidad de falla durante el suministro del servicio; esto es, el tiempo durante el que la obra cumple su cometido.

Para que un sistema sea rentable (que sus beneficios sean mayores respecto a los daños o pérdidas) requiere de una evaluación desde una perspectiva de confiabilidad o riesgo, debido a que variables como el escurrimiento que se caracterizan por lo aleatorio de su naturaleza o la incertidumbre misma de sus registros, son la base para su diseño. Más aún, al diseñar obras de protección contra inundaciones, generalmente como consecuencia de su costo, no deben construirse de una magnitud tan grande como para evitar los daños provocados por todas las posibles avenidas. Por lo que el problema para definir la magnitud de las obras es un problema de optimización (maximizar los beneficios minimizando los costos).

Aunque el planteamiento del problema en términos de una relación costos - beneficios es conceptualmente correcto, la cuantificación de los conceptos que intervienen en dicha relación es difícil, de manera que ha sido necesario recurrir a otras metodologías para dimensionar adecuadamente las obras.

A continuación se describen tres métodos para estimar el riesgo (o el periodo de retorno) adecuado para el diseño. Primero se describe un método que se basa en la relación costos - beneficios expresados estos últimos en valor monetario. El segundo método se refiere a los conceptos tradicionales y las herramientas necesarias para utilizarlos. Mientras que el tercero se basa en la simulación del funcionamiento hidráulico de diversas opciones de diseño y compara costos vs beneficios, pero sin la necesidad de expresar ambos conceptos en términos monetarios.

#### **4.1 RELACIÓN COSTOS - BENEFICIOS**

Una de las principales limitantes de las metodologías tradicionales es la toma de decisiones, ya que para el diseño únicamente se utiliza una sola tormenta, sin tomar en cuenta la probabilidad de ocurrencia de otras tormentas (sobre todo mayores que la seleccionada) y la magnitud de sus potenciales daños, la finalidad del estudio es determinar el diseño más adecuado en términos económicos para lo cual debe tomar en cuenta los conceptos siguientes:

- a) Un estudio estadístico de la magnitud de las avenidas que pueden presentarse durante la vida útil de la obra.
- b) Un estudio de opciones de diseño que refleje, en términos monetarios, el monto de los daños asociados a las avenidas identificadas en el inciso anterior.

Si se designa como propuesta "i" aquella que permite controlar una avenida de magnitud  $Q_i$ , el problema se resolvería comparando en términos monetarios, los costos de construcción  $CC_i$  respecto a la reducción en el valor de los daños esperados por inundación  $CD_i$ . Este último valor es igual a la integral, para todos los valores posibles de  $Q$ , del producto de los daños que causaría una avenida de magnitud  $Q$  por la probabilidad de que dicha avenida se presente durante la vida útil de la estructura. Esto es:

$$CD_i = \int_{Q_i}^{\infty} D_i(Q) f(Q, L) dQ$$

donde

$CD_i$  costo esperado por daños, si se diseña el sistema para un gasto  $Q_i$

$D_i(Q)$  daños que causaría una avenida de magnitud  $Q$ , si el diseño se realizó para un gasto  $Q_i$

$f(Q, L)_i$  función de densidad de probabilidad de que durante los "L" años de vida útil se presenten avenidas de magnitud  $Q$ .

El problema principal de esta metodología radica en estimar correctamente el valor monetario de los daños asociados a una inundación (Domínguez, 1977).

## 4.2 METODOLOGÍA TRADICIONAL

La práctica usual consiste en definir un riesgo aceptable, en términos del periodo de retorno de la avenida máxima que puede manejar la obra sin presentar daños. Esta metodología se ha generalizado debido a su sencillez, ya que relaciona la magnitud de la obra con el periodo de retorno de la avenida de diseño; no obstante, los principales inconvenientes que presenta son:

- a) Está basada en una gran experiencia, pero subjetiva (mencionado en el inciso 2.4.2 Análisis estadístico)
- b) No se toma en cuenta explícitamente la magnitud de los daños que podrían causar avenidas mayores que la de diseño.
- c) No siempre es correcto extrapolar las experiencias que se tienen como resultado de los diseños en un determinado sitio a otro diferente (menos aún de un tipo de obras a otro tipo diferente).

La aplicación de este método se resume, básicamente, en tres pasos:

a) Selección del periodo de retorno

En la mayoría de las ocasiones el periodo de retorno de la tormenta de diseño se elige en función del tipo de zona que será protegida por la obra, tomando en cuenta los daños directos que podría causar una inundación, así como con sus correspondientes daños indirectos. Para ello, es común auxiliarse con tablas similares a la 2.1.

b) Cálculo de la tormenta de diseño

Una vez seleccionado el periodo de retorno de la tormenta de diseño, ésta se obtiene mediante los procedimientos tradicionales (maximizando la tormenta histórica, PMP, etc.).

c) Diseño de la obra

El diseño de la obra debe permitir un buen manejo de cualquier tormenta cuya magnitud sea igual o menor que la de diseño y, en general, el correcto funcionamiento hidráulico de la obra, con la finalidad de evitar problemas derivados de ello.

#### **4.3 DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE RIESGO MEDIANTE SIMULACIÓN**

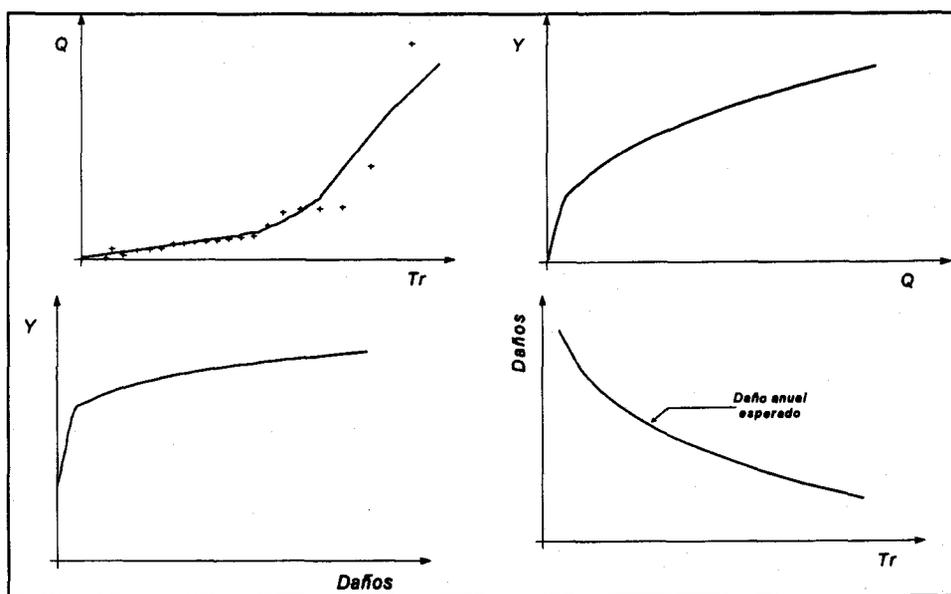
La dificultad para definir, en términos monetarios, el costo asociado a una inundación de determinada magnitud, ha llevado a desarrollar criterios que consisten básicamente en simular el funcionamiento hidráulico de las diferentes opciones de diseño para tormentas con diversos periodos de retorno, presentando a quien deberá tomar las decisiones una descripción organizada de las consecuencias asociadas para cada opción, pero sin traducirlas a valores monetarios.

Con el análisis de inundaciones (ocurrencia, en el tiempo, y magnitud, en el espacio) se estima la probabilidad de exceder una combinación específica gasto - volumen durante un cierto intervalo de tiempo. Sin embargo, para una adecuada cuantificación de los daños, se deben tomar en cuenta aspectos hidrológicos, hidráulicos y económicos para con ello proponer las medidas necesarias para reducir los daños debidos a inundaciones.

La clave para evaluar económicamente proyectos encaminados al control de inundaciones es la relación inundación - periodo de retorno que se basa en la estimación de los daños anuales esperados.

Los beneficios por la reducción de daños debidos a inundaciones son evaluados en función del decremento de los daños anuales esperados, resultado de la puesta en marcha de acciones particulares. El aumento de estos beneficios es consecuencia de una adecuada planeación durante la concepción del proyecto (por ejemplo, un mejor aprovechamiento del uso de las planicies de inundación al cambiar cosechas de bajo valor por otras de valor más alto, sabiendo que hasta el momento de levantar la cosecha no existirá peligro de inundación). Por otra parte, los beneficios debidos a la disminución en los daños son el resultado de la reducción de inundaciones en las planicies ocupadas (por ejemplo, al considerar bordos longitudinales los beneficios equivalen a los daños anuales esperados sin construir las obras, menos los daños anuales esperados una vez realizado el proyecto).

Las relaciones funcionales básicas para la estimación de los daños anuales esperados se muestran en la figura 26. Las relaciones gasto máximo - periodo de retorno, gasto máximo - elevación de la superficie libre del agua y elevación de la superficie libre del agua - daños esperados, se obtienen mediante estudios que parten del reconocimiento en campo y la modelación matemática de los fenómenos (probabilidad de ocurrencia, área de afectación, consecuencias asociadas al evento, etc.). Mientras que la función periodo de retorno - daños esperados es derivada de las tres funciones anteriores.



**Figura 26 Relaciones para el análisis del daño anual esperado.**

La relación gasto máximo - periodo de retorno define la probabilidad de ocurrencia de los gastos capaces de provocar inundaciones y se lleva a cabo utilizando metodologías de ingeniería hidrológica. La relación hidráulica entre la elevación de la superficie libre del agua y el gasto máximo se basa en el cálculo del perfil de la superficie libre del agua, que se obtiene por medio del tránsito de la avenida. La relación superficie libre del agua - daños esperados representa las pérdidas ocasionadas en el caso de que la inundación alcanzara diferentes niveles. Ahora bien, para obtener la relación superficie libre del agua - daños esperados, se aprovechan tres factores: el uso de información referente a daños de avenidas históricas en el área de estudio, la estimación del costo de los daños (suponiendo diferentes niveles de inundación) y la relación entre la profundidad de la inundación y el porcentaje de los daños.

Lo anterior pone de manifiesto la necesidad de realizar rutinariamente análisis para estimar los daños anuales. El esquema general se debe basar en la siguiente información: las relaciones básicas para definir los daños anuales esperados en función de la probabilidad de ocurrencia, la evaluación del impacto de las diferentes obras (afectaciones, medidas no estructurales, desarrollo de cuencas y otras modificaciones) y tomar en cuenta las posibles incertidumbres en los datos básicos.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Cuando se presenta una inundación en la zona aledaña a algún río que cuenta con obras de protección y en ella existen asentamientos humanos, la mayor parte de responsabilidad de las pérdidas humanas y destrucción de las viviendas y pertenencias de esas personas es de las autoridades que hayan tolerado dichos asentamientos así como de los grupos políticos u organizaciones que los hayan alentado y propiciado. En caso de no retirar la vegetación, no limpiar los cauces de inundación o permitir que los accesos de los puentes obstruyan los escurrimientos en dichos cauces, esas mismas autoridades serán culpables de la falla de las obras y las consecuentes afectaciones. Para minimizar esos riesgos es fundamental que durante la concepción del proyecto se defina cuáles serán las avenidas que pueden manejarse con las obras proyectadas sin incrementar el riesgo de quienes están protegidos por ellas, al operar la infraestructura hidráulica disponible.

A pesar de las grandes inversiones en medidas estructurales (obras de protección contra inundaciones) para disminuir los daños por avenidas en alguna zona, la experiencia de otros países (N.H.R., 1992) demuestra que el producto de los daños potenciales y su probabilidad de ocurrencia se incrementan a medida que la población se siente más segura, por lo que las acciones no estructurales cobran mayor relevancia. Más aún, como se comentó en su momento, nunca se podrá eliminar totalmente el riesgo de sufrir una inundación por lo que aún con la construcción de obras físicas debe aprenderse a convivir con el río y sus crecidas.

Dada la frecuencia con la que se presentan las inundaciones en diferentes regiones del territorio nacional, es de particular importancia estar preparados para enfrentarlas y responder adecuadamente. Por lo que las principales medidas complementarias a las anteriores son:

- a) *Usos del suelo.* En la mayoría de los casos, es la medida más eficaz, pero contrariamente a lo que pueda pensarse, es poco aplicada. Con una adecuada ordenación se deben evitar aquellos usos que agraven la problemática respecto a daños por inundación en las zonas con mayor riesgo. Una opción es el establecimiento de tres zonas:
  - Un corredor para las crecidas, constituido por el cauce y una franja adyacente donde exista total prohibición de usos. Esta zona corresponde a un alto riesgo.
  - Una zona con fuertes restricciones, correspondiente a las inundaciones de riesgo medio.
  - Una zona con restricciones menores, correspondiente a inundaciones de bajo riesgo.

La aplicación de esta zonificación requiere la elaboración de mapas donde se marquen las regiones se presentan inundaciones para advertir a la población asentada en ellas o bien impedir que en éstas se ubiquen más personas para vivir.

b) *Sistemas de alerta y control.* Sus funciones son predecir la posible presencia de Para alguna avenida, evaluar su correspondiente riesgo de daños (con base en su magnitud), difundir el aviso de la ocurrencia del fenómeno y preparar la respuesta al aviso <sup>2</sup>.

Para optimar la utilización de este tipo de medidas, es importante recordar dos puntos:

- La educación y la información .del público en general y de los responsables de coordinar tales medidas ayuda a disminuir los daños al encontrar una población más preparada.
- El tiempo de “pre-aviso” es la suma del tiempo de respuesta de la cuenca menos el tiempo de cálculo. Su utilidad se centra en la prevención de daños y su eficacia aumenta con el tiempo de pre-aviso.

Es posible hablar de más medidas (adecuación de la infraestructura urbana, etc.); sin embargo, las antes mencionadas son las más representativas.

El establecimiento de medidas estructurales para la defensa contra inundaciones puede disminuir el valor intrínseco de la planicie de inundación y los terrenos aledaños al río, sin llegar a compensar sus beneficios, o bien, su diseño pueden variar según el criterio y experiencia del ingeniero proyectista, por lo que el mejor arreglo dependerá de la conjunción de los aspectos tanto económico como técnico, así como el tiempo de ejecución.

Por otra parte, de acuerdo con las metodologías empleadas para el análisis de riesgo, es indispensable tratar de introducir, sino todas las variables cuya intervención es clave para el diseño de las estructuras, al menos aquéllos parámetros que tienen influencia directa para la selección y dimensionamiento de la mejor opción.

Finalmente, para llevar a buen término el propósito anterior (y que no quede sólo en esto) es indispensable que, por una parte, el ingeniero proyectista se preocupe por integrar en sus cálculos las variables realmente representativas y , por otra, los organismos encargados de Registrar variables, en este caso hidroclimatológicas, se preocupen por lograr un registro representativo y confiable de las mismas.

---

<sup>2</sup> La respuesta al aviso consiste en elaborar un plan de evacuación de personas, animales y cosas; lucha personal o colectiva contra la inundación y un plan de asistencia a los damnificados. En México el organismo encargado de estudiar, poner en marcha y coordinar dichas acciones es Protección Civil.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Berkeley, R. (ed), "River Engineering and water conservation works", Butterworths, London 1966.
2. CENAPRED, Revista "Prevención", Aprendiendo a convivir con las inundaciones, No. 7, pp. 20-25, México, diciembre 1993.
3. CENAPRED, Revista "Prevención", Algunos problemas relacionados con las inundaciones, No. 6, pp. 7-15, México, agosto 1993.
4. CNA, "Manual de Ingeniería de ríos", Estudio hidrológico para obras de protección, Cap. 3, México 1993.
5. Gutiérrez, R., "Obras de encauzamientos fluviales: disposiciones y tipologías", Ingeniería Civil, CEDEX, Madrid 1979.
6. Maza, J.A. y Domínguez R., "Presas y bordos longitudinales para el control de inundaciones, problemas en su operación", memorias del XIII Congreso Nacional de Hidráulica, Vol. 2, No. 26, Puebla 1994.
7. Przedwojski B. y Blazejewski R., "River Training Techniques", Fundamentals, Design and Applications, Ed. A.A. Balkema, Rotterdam 1995.
8. Universidad Politécnica de Valencia, "Delimitación de riesgos de inundabilidad a escala regional en la Comunidad Valenciana", Informe final, Departamento de Ingeniería Hidráulica y medio ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Proyecto de I+D, España 1992.
9. Vega Ó., "Presas de almacenamiento y derivación", Facultad de Ingeniería, DEPT - UNAM, México 1980.
10. Wurbs, R., "Modeling and analysis of reservoir system operations", Ed. Prentice Hall PTR, N. J., 1996.

## REFERENCIAS

1. Domínguez, R., "Criterios racionales de riesgo para el diseño de obras de drenaje urbano", informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, México 1977.
2. Domínguez R. y Sánchez J.L., "Las inundaciones en México", Proceso de formación y formas de mitigación, Coordinación de investigación, Área de Riesgos hidrometeorológicos, CENAPRED, México 1990.
3. Ferrer, P., J., "Análisis estadístico de caudales de avenida", Serie Monografías, CEDEX, Centro de Estudio Hidrográficos, Madrid 1992.
4. Fuentes, O., et al., "Escurremientos en ríos y volúmenes de inundación por desbordamiento", Cuadernos de investigación, No. 26, CENAPRED, México 1996.
5. García, F. et al., "Un estado del arte y un modelo simple de los incendios forestales", Coordinación de investigación, Área de Riesgos hidrometeorológicos, CENAPRED, México 1997.

6. Japan's Ministry of Construction, "Protecting Comfortable and Healthy Lives", Sabo Department, River Bureau, Japan's Ministry of Construction, Tokyo, 1992.
7. Martín M., J.M., "Los recursos hidráulicos", Primera parte: panorámica mundial, CEDEX, Centro de Estudio Hidrográficos, Madrid 1996.
8. Maza, J.A. y Franco, V., "Manual de Ingeniería de ríos", Obras de protección para control de inundaciones, Cap. 16, Instituto de Ingeniería, UNAM, México 1993.
9. Natural Hazards Research and Applications Information Center, "Floodplain management in the United States: an assessment report, University of Colorado at Boulder, 1992.
10. Secretaría de Gobernación, "Atlas Nacional de Riesgos", México 1991.
11. SRH, "Atlas del Agua de la República Mexicana", Secretaría de Recursos Hidráulicos, México 1976.
12. Torres, F., "Obras hidráulicas", Ed. Limusa, México 1980.
13. Water Resources Council, "Principles and Guidelines for Water and Related Land Resources Planning", Government Printing Office, March 1983.
14. WMO-UNESCO, "Glosario Hidrológico Internacional", WMO/OMM/BMO, No. 385, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza 1974.

## **RECONOCIMIENTOS**

El autor agradece la colaboración del M. en I. José Antonio Maza Álvarez, del M. en I. Víctor Franco, así como del Dr. Óscar A. Fuentes Mariles, jefe del Área de Riesgos Hidrometeorológicos del CENAPRED, por sus acertados comentarios para el enriquecimiento de esta publicación.

Finalmente a la Arq. Noemí Alvarado Durán y a la Srita. Rita Rosales Saldivar por el trabajo de dibujo y las correcciones a las diferentes versiones del manuscrito, respectivamente.

## TITULOS PUBLICADOS

**Cuaderno de Investigación No. 1:** *Bases de datos para la estimación de riesgo sísmico en la ciudad de México*; Mario Ordaz, Roberto Meli, Carlos Montoya Dulché, Lorenzo Sánchez y L. E. Pérez Rocha.

**Cuaderno de Investigación No. 2:** *Transporte, destino y toxicidad de constituyentes que hacen peligroso a un residuo*; María Esther Arcos Serrano, Josefina Becerril Albarrán, Margarita Espíndola Zepeda, Georgina Fernández Villagómez y María Eugenia Navarrete Rodríguez.

**Cuaderno de Investigación No. 3:** *Procesos fisicoquímicos para estabilización de residuos peligrosos*; Margarita Yolanda Espíndola Zepeda y Georgina Fernández Villagómez.

**Cuaderno de Investigación No. 4:** *Reflexiones sobre las inundaciones en México*; Ramón Domínguez Mora, Martín Jiménez Espinosa, Fermín García Jiménez y Marco Antonio Salas Salinas.

**Cuaderno de Investigación No. 5:** *Modelo lluvia-escurrencimiento*; Ramón Domínguez Mora, Martín Jiménez Espinosa, Fermín García Jiménez y Marco Antonio Salas Salinas.

**Cuaderno de Investigación No. 6:** *Comentarios sobre las normas industriales japonesas de la calidad del concreto; Práctica de Diseño y Construcción en el Japón*; editados por Motoji Saito y Hideaki Kitajima; traducidos por Keiko Suzuki; revisados por Sergio M. Alcocer.

**Cuaderno de Investigación No. 7:** *Comentarios sobre las normas industriales japonesas de la calidad de agregados para concreto*; editados por Motoji Saito y Hideaki Kitajima; traducidos por Keiko Suzuki; revisados por Sergio M. Alcocer.

**Cuaderno de Investigación No. 8:** *Report on the January 17, 1994 Northridge Earthquake Seismological and Engineering Aspects; Estudios de Campo*; Takeshi Mikumo, Carlos Gutiérrez, Kenji Kikuchi, Sergio M. Alcocer y Tomás A. Sánchez.

**Cuaderno de Investigación No. 9:** *Application of FEM (Finite element method) to RC (Reinforced concrete) structures; Investigaciones sobre Sismología e Ingeniería Sísmica en el Japón*; Hiroshi Noguchi.

**Cuaderno de Investigación No. 10:** *Japanese Press Design Guidelines for Reinforced Concrete Buildings; Práctica de Diseño y Construcción en el Japón*; Shunsuke Otani.

**Cuaderno de Investigación No. 11:** *Development of advanced reinforced concrete buildings using high-strength concrete and reinforcement -New Construction Technology in Japan-; Investigaciones sobre Sismología e Ingeniería Sísmica en el Japón*; Shunsuke Otani.

**Cuaderno de Investigación No. 12:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1993*; Bertha López Najera, Roberto Quaa Weppen, Salvador Medina Morán, Enrique Guevara Ortiz y Ricardo González Frago.

**Cuaderno de Investigación No. 13:** *Normas de Diseño para Estructuras de Mampostería del Instituto de Arquitectura del Japón; Práctica de Diseño y Construcción en el Japón*; traducción: Koji Yoshimura, Kenji Kikuchi y Tomás A. Sánchez.

**Cuaderno de Investigación No. 14:** *Informe del estado actual de las edificaciones dañadas durante el sismo de Michoacán de 1985 en la zona epicentral (Revisión de los métodos de reparación y refuerzo empleados) - Informe sobre las Ciudades de Lázaro Cárdenas e Ixtapa/Zihuatanejo-; Estudios de Campo*; Shunsuke Otani, Kenji Kikuchi, Sergio M. Alcocer y Oscar López B.

**Cuaderno de Investigación No. 15:** *A study on nonlinear finite element analysis of confined masonry walls*; Kazuhiko Ishibashi y Hideo Katsumata.

**Cuaderno de Investigación No. 16:** *Deterministic inverse approaches for near-source high-frequency strong motion*; Masahiro Iida.

**Cuaderno de Investigación No. 17:** *Seguridad sísmica de la vivienda económica*; R. Meli, S. M. Alcocer, L. A. Díaz Infante, T. A. Sánchez, L. E. Flores, R. Vázquez del Mercado y R. R. Díaz.

**Cuaderno de Investigación No. 18:** *Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual*; Shri K. Singh y Mario Ordaz.

**Cuaderno de Investigación No. 19:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1990;* Bertha López Najera, Roberto Quaa Weppen, Salvador Medina Morán, Enrique Guevara Ortiz y Ricardo González Frago.

**Cuaderno de Investigación No. 20:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1991;* Bertha López Najera, Roberto Quaa Weppen, Salvador Medina Morán, Enrique Guevara Ortiz y Ricardo González Frago.

**Cuaderno de Investigación No. 21:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1992;* Bertha López Najera, Roberto Quaa Weppen, Salvador Medina Morán, Enrique Guevara Ortiz y Ricardo González Frago.

**Cuaderno de Investigación No. 22:** *Development of new reinforced concrete structures;* Hiroyuki Aoyama.

**Cuaderno de Investigación No. 23:** *Respuesta sísmica de edificios de mampostería desplantados en suelo blando;* Roberto Durán Hernández y Eduardo Miranda Mijares.

**Cuaderno de Investigación No. 24:** *Erosión de laderas;* Fermín García Jiménez, Oscar Fuentes Mariles y Jesús Gracia Sánchez.

**Cuaderno de Investigación No. 25:** *Espectros de diseño sísmico para limitar el daño estructural;* M. Ordaz y E. Faccioli.

**Cuaderno de Investigación No. 26:** *Escurrimientos en ríos y volúmenes de inundación por desbordamiento;* Oscar Arturo Fuentes Mariles, Marco Antonio Salas Salinas, Martín Jiménez Espinosa, María Teresa Vázquez Conde y Fermín García Jiménez.

**Cuaderno de Investigación No. 27:** *Muestreo y caracterización de residuos peligrosos;* María Eugenia Navarrete Rodríguez y Josefina Becerril Albarrán.

**Cuaderno de Investigación No. 28:** *Avenidas de diseño para presas de gran capacidad;* María Teresa Vázquez Conde, Martín Jiménez Espinosa, Ramón Domínguez Mora y Oscar Fuentes Mariles.

**Cuaderno de Investigación No. 29:** *Tecnologías de tratamiento para la descontaminación de suelos;* Carlos Manuel Ibarra Díaz, María Esther Arcos Serrano, Cecilia Izcapa Treviño y Georgina Fernández Villagómez.

**Cuaderno de Investigación No. 30:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1994;* Bertha López Najera, Roberto Quaa Weppen, Martha Legorreta Díaz, Enrique Guevara Ortiz, Ricardo González Frago, David Almora Mata y Ricardo Vázquez Larquet.

**Cuaderno de Investigación No. 31:** *A statistical method for the investigation of site effects by means of downhole array -SH and Love waves-;* Shigeo Kinoshita.

**Cuaderno de Investigación No. 32:** *Introducción al método de pruebas en línea controladas por computadora -pruebasseudodinámicas-;* Oscar López Bátiz, Masayoshi Nakashima, Naoki Tanaka, Hiroto Kato y Jun Tagami.

**Cuaderno de Investigación No. 33:** *Microzonificación sísmica de la ciudad de Colima;* Carlos Gutiérrez M., Kazuaki Masaki, Javier Lermo y Julio Cuenca.

**Cuaderno de Investigación No. 34:** *Estudios del subsuelo en el valle de México;* Yamashita Architects & Engineers Inc. Oyo Corporation, Miguel A. Santoyo.

**Cuaderno de Investigación No. 35:** *Un Procedimiento para el Diseño de Obras de Excedencias;* José Luis Sánchez Bribiesca, Fernando González Villarreal, Ramón Domínguez Mora, Martín Jiménez Espinosa.

**Cuaderno de Investigación No. 36:** *Norma para la Evaluación del Nivel de Daño por Sismo en Estructuras y Guía Técnica de Rehabilitación (Estructuras de Madera);* Takeshi Jumonji.

**Cuaderno de Investigación No. 37:** *Norma para la Evaluación del Nivel de Daño por Sismo en Estructuras y Guía Técnica de Rehabilitación (Estructuras de Concreto Reforzado);* Takeshi Jumonji.

**Cuaderno de Investigación No. 38:** *Estimación del riesgo volcánico en términos de la distribución estadística de erupciones explosivas;* Servando de la Cruz-Reyna

**Cuaderno de Investigación No. 39:** *Normas y comentarios para la evaluación del comportamiento ante sismo de estructuras existentes de concreto reforzado;* Takeshi Jumonji.

**Cuaderno de Investigación No. 40:** *Informe del daños en edificaciones durante el sismo de Colima del 9 de octubre en la zona epicentral -Informe sobre las ciudades de Manzanillo, Cihuatlán, Barra de Navidad, Melaque y Jaluco-;* Oscar López Bátiz, Masaomi Teshigawara.

**Cuaderno de Investigación No. 41:** *Módulo matemático de áreas de inundación;* Óscar Arturo Fuentes Mariles, Luis Eduardo Franco Hernández.

**Cuaderno de Investigación No. 42:** *Probabilidad de presentación de ciclones trópicos en México;* Óscar Arturo Fuentes Mariles, María Teresa Vázquez Conde.

**Cuaderno de Investigación No. 43:** *Guía de diseño para refuerzo sísmico de estructuras existentes de concreto reforzado;* Takeshi Jumonji.

**Cuaderno de Investigación No. 44:** *Guía de aplicación de la norma de evaluación de comportamiento ante sismo y de la Guía de refuerzo para estructuras existentes de concreto reforzado (edición revisada);* Takeshi Jumonji.

**Cuaderno de Investigación No. 45:** *Red de Observación Sísmica del CENAPRED. Registros acelerográficos obtenidos durante 1995;* Bertha López Nájera, Roberto Quaas Weppen, Ramón Ruíz Quintana, Mauricio Ortega Ruíz, David Almora Mata y Ricardo Vázquez Larquet.

**Cuaderno de Investigación No. 46:** *Análisis de sequías en México;* Fermín García Jiménez y Óscar Arturo Fuentes Mariles.

**Cuaderno de Investigación No. 47:** *Metodología para la prevención de accidentes y daños a la salud y al ambiente ocasionados por mercurio o sus compuestos;* Luis Soria Puente.

**Cuaderno de Investigación No. 48:** *Estimación de espectros de respuesta elastoplástica;* Mario Ordaz, y Luis Eduardo Pérez Rocha

**Cuaderno de Investigación No. 49:** *Obras de Protección contra inundaciones;* Marco A. Salas Salinas





SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN  
COORDINACIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES