

- e) Frecuencia de incidencia - Los daños potenciales totales en una llanura de inundación están relacionados con el efecto acumulativo de los factores aleatorios de altura de las aguas, duración y velocidad medidos durante un prolongado período de tiempo. Con gran frecuencia, aunque no de forma exclusiva, esto influirá en las decisiones sobre la planificación de autorizaciones, especialmente si el riesgo puede medirse en términos cuantitativos. La frecuencia acumulativa de incidencia de los diversos riesgos es por consiguiente un factor de importancia en el desarrollo del aprovechamiento de las tierras. Es un factor que las comunidades agrícolas en todo el mundo han tenido siempre en cuenta, de ordinario sobre la base de la experiencia y del razonamiento intuitivo, para decidir el tipo y la intensidad de la explotación agrícola o pecuaria aplicables en las regiones expuestas a inundaciones.
- f) Estacionalidad - La inundación de la tierra durante la estación en que crecen los cultivos puede tener un efecto totalmente destructor de la producción agrícola, tan grave de hecho como una sequía prolongada. Puede asimismo influir considerablemente en las penalidades y el nivel general de subsistencia de las comunidades afectadas si la inundación se produce durante el tiempo frío y si su causa predominante es la fusión de la nieve con posibles glaciares. Por consiguiente, en las grandes inundaciones la estacionalidad tiene una influencia importante en la gravedad del riesgo correspondiente.

Estimación de las crecidas

2.1.1 Como primer paso para evaluar el riesgo de inundación y sus múltiples criterios conexos, el hidrólogo aplica un programa de estimación de las crecidas, relativo a la determinación de los futuros caudales de crecida y sus características inherentes. En la mayoría de los casos esto entraña la estimación de los caudales máximos de crecida (y de los niveles del río) y de su frecuencia en una determinada sección transversal del río. Alternativamente, podría implicar también la estimación de un máximo teórico en condiciones sumamente extremas. Cuando lo exige la ocasión, se establece un hidrógrafo* completo de las inundaciones para el caudal máximo deducido. Esto supone la importancia, y por consiguiente la estimación del volumen de crecida. Pero sólo se hace si van a ser proyectados y puestos en funcionamiento métodos de control por embalse, o si la sección respecto de la cual se ha efectuado inicialmente la estimación se encuentra alejada del tramo en el que es necesaria la prevención de desastres, y por consiguiente, se precisa una labor de previsión de riadas para determinar los cambios adecuados en los caudales máximos. En la metodología hidrológica normal para la estimación de crecidas, por lo general se trata solamente de calcular las características de crecida relacionadas con los criterios de altura del agua (y caudal), frecuencia de incidencia, gravedad máxima posible, coeficientes de elevación del nivel del agua y duración de las alturas críticas de la superficie líquida**.

Nota: * Un hidrógrafo o carta hidrográfica es la representación gráfica de la variación de altura o caudal con el tiempo.

** La altura de la superficie líquida (stage) es una expresión utilizada para designar la altura del agua por encima de un nivel de referencia fijado.

En la práctica, en muchas situaciones, el método o métodos adoptados depende de los datos disponibles, de las características regionales y de la intuición del hidrólogo. A menudo es una labor de la máxima dificultad; con frecuencia las estimaciones que se consiguen entrañan un alto grado de incertidumbre. Por este motivo se recomienda que se emplee más de un método para calcular las corrientes y niveles de crecida para cualquier aplicación aislada.

Análisis de frecuencia de las crecidas

2.1.1.1 Cuando se dispone de datos sobre el nivel y/o caudal del río relativos a un número importante de años para una determinada sección transversal del cauce, pueden aplicarse métodos normales de análisis de frecuencia con el fin de determinar la frecuencia probable en la que un determinado caudal máximo (nivel) del río será igualado o sobrepasado. Este procedimiento de análisis tiene de ordinario una base gráfica y consiste principalmente en el trazado de los caudales máximos observados en orden de magnitud en relación con una escala de probabilidades. La inversa de una escala de probabilidades es una escala del "período de retorno", que es simplemente el intervalo medio de tiempo (T años) que transcurre entre las crecidas con caudales máximos que exceden de algún valor (crítico) prescrito. (Este valor podría ser, por ejemplo, el caudal con el cual el río discurre con el álveo lleno sin desbordarse). Para determinar los valores T , a efectos de su trazado, los caudales máximos de crecida registrados se clasifican por orden de magnitud (m), de manera que si hubiera N años de datos, el valor de T se calcularía mediante la ecuación $T = \frac{m}{N + 1}$ para un caudal máximo registrado. Así, después del análisis,

el hidrólogo puede calcular el caudal máximo (Q_T) que sería igualado o sobrepasado como promedio 1 (vez) en T años.

Los desastres de inundaciones habitualmente van asociados a acontecimientos muy poco frecuentes, por ejemplo con un valor T del orden de 50 a 100 años. La estimación de Q_T para esos períodos de retorno generalmente está sometida a incertidumbre. En primer lugar, muchos datos no abarcan un período de 50 años o más, por lo que la estimación de los caudales máximos de infrecuencia mayor exigen una extrapolación gráfica no decisiva. En segundo lugar, los datos que se analizan representan sólo una muestra. No hay nada que indique que en los 50 años siguientes o un período parecido existirá el mismo medio hidrológico. Por consiguiente, podría ser adecuada una distribución diferente de frecuencia y habría que cambiar los criterios aplicables a los desastres. Por tanto, las estimaciones no son más que eso, estimaciones o incluso "estimaciones-conjeturas", y es importante comprender que incluso cuando se dispone de muchos datos hidrológicos, existe siempre un cierto grado de incertidumbre, por lo que las decisiones de planificación subsiguientes para la prevención de desastres deberán adoptarse teniéndolo en cuenta.

Análisis de frecuencia regional

2.1.1.2 Cuando existen datos relativos a un número menor de años sobre un determinado río, pero se dispone de registros de caudales máximos sobre varios ríos dentro de la región, también es posible calcular las frecuencias de crecidas si se utilizan todos los datos disponibles. El método técnico que ha de aplicarse se basa en el principio de que dentro de una región hidrológicamente homogénea, las relaciones de $\frac{Q_T}{\bar{Q}}$ son constantes en los ríos principales (Q_T es el caudal máximo

con un período de retorno de T años y $\bar{Q}$ es el caudal máximo medio anual). De esa manera, un promedio de todas las estimaciones de la misma relación $\frac{Q_T}{Q}$ deducidas de

diversas áreas de captación de aguas computadas dentro de una región se considera que da una estimación mejor del valor regional. Por tanto, para un río con muy pocos datos, pero respecto del cual puede calcularse el valor Q directa o indirectamente, el producto de su valor Q por la relación requerida adecuada $\frac{Q_T}{Q}$.

da una estimación del valor Q_T , caudal máximo de los ríos para el período de retorno de T años.

El desarrollo de valores $\frac{Q_T}{Q}$ regionales exige un análisis de frecuencia de los datos de cada uno de los ríos, por muy corto que sea en ese momento el período de registro. No se describen aquí los detalles de este aspecto ni las técnicas para combinar los valores de las relaciones.

Para un río regional respecto del que no existen datos, pero cuyo valor $\bar{Q}$ es necesario calcular antes de que pueda determinarse el valor Q_T , un método útil es proceder al desarrollo inicial de una relación regional entre el Q y los parámetros del área de captación fisiográfica, utilizando los datos relativos a las áreas de captación computadas. También podrían incluirse en esa relación los parámetros meteorológicos, que normalmente se reducen a la correlación estadística entre Q y los parámetros independientes. Una relación sencilla y muy eficiente es, por ejemplo:

$$\bar{Q} = a A^b$$

en la que A es el área de captación de aguas

y a y b son coeficientes que han de ser evaluados.

Esta relación y otras más elaboradas han venido usándose desde hace más de 50 años y proporcionan una concatenación esencial entre las características del área de captación de aguas y las corrientes de crecida en la estimación de las crecidas cuando son escasos los datos. En la Fig. 2.3 se muestra un ejemplo de relación paramétrica correspondiente a las corrientes de Africa oriental.

Máximos de crecida - "La crecida regional"

2.1.1.3 Los caudales máximos extremos posibles, para su empleo en situaciones de cálculo especiales, se determinan habitualmente trazando líneas envolventes en un gráfico de valores máximos extremos anotados con referencia al área de captación, cuando existen tales datos para un número suficiente de áreas de captación en una región. Existen también otras técnicas distintas que entrañan la maximización de las precipitaciones tempestuosas, pero son de difícil aplicación y en muchos casos son demasiado indecisas y no se atienen a la realidad. Cuando son escasos los datos, pueden utilizarse relaciones empíricas del envolvente, como la ecuación Myer-Jarvis:

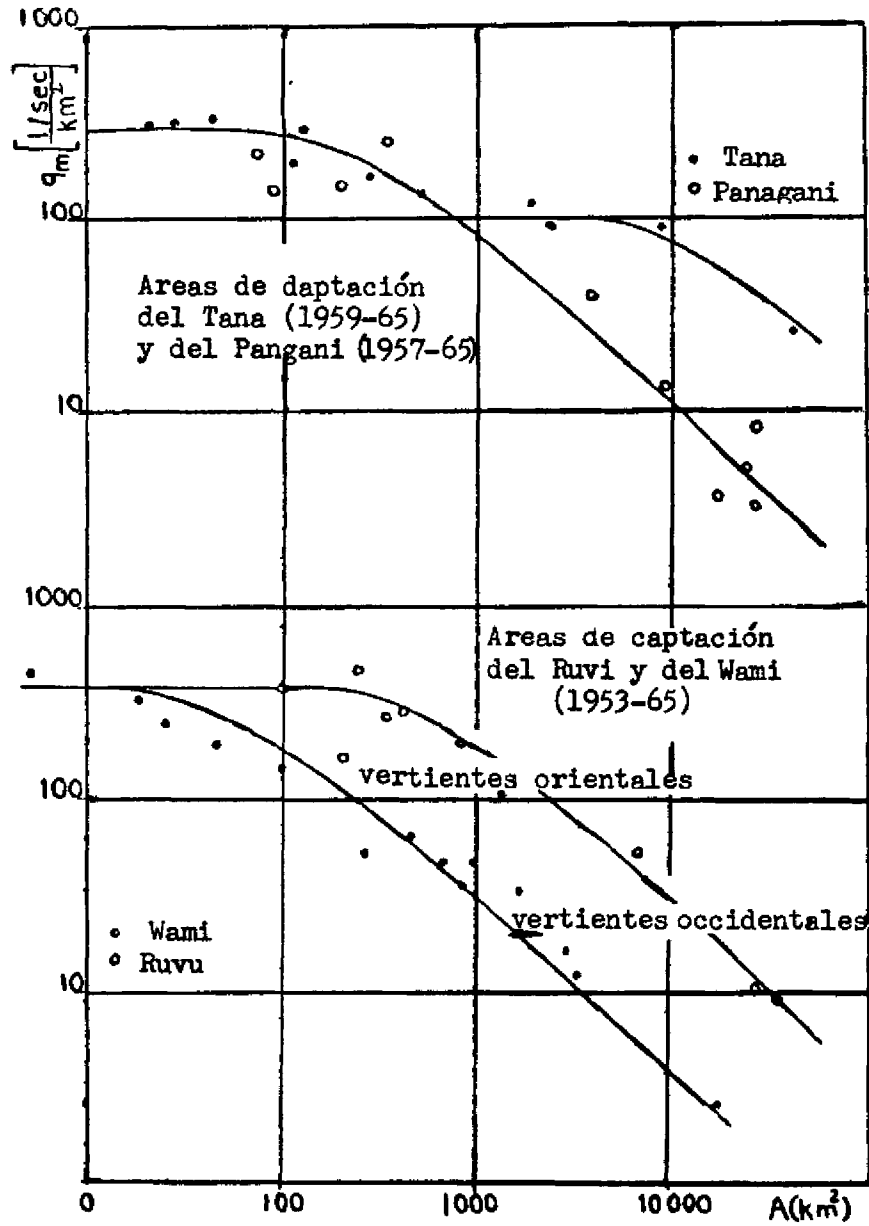


Figura 2.3 - La relación del caudal específico de cálculo con las áreas de captación de aguas en el caso de las corrientes de Africa oriental

$$Q_{\max} = \frac{100p}{\sqrt{A}}$$

en la cual p es un parámetro regional apropiado, que puede elegirse entre valores experimentados y recomendados.

Con gran diferencia, la manera más eficaz de determinar los niveles extremos de crecida (y por consiguiente los caudales correspondientes) es proceder a un estudio exhaustivo de las condiciones ribereñas del río y al interrogatorio de los habitantes del lugar. Los habitantes más ancianos pueden recordar muy frecuentemente condiciones catastróficas, especialmente si ocurrieron en los primeros años de su vida. Una encuesta racional puede conducir a un hidrólogo a definir conclusiones precisas sobre la gravedad de inundaciones pasadas, y esto puede conducir a una estimación intuitiva de suma eficacia del máximo probable o al menos de un acontecimiento muy insólito. El medio morfológico y vegetal en la llanura de inundación y sus alrededores puede servir de guía sumamente útil para este razonamiento intuitivo. Pueden identificarse antiguos lechos del río, y la edad y tipo de vegetación, juntamente con la naturaleza y granulometría del suelo y de los yacimientos de arena o grava, pueden resultar de utilidad para estudiar cuándo, dónde y con qué frecuencia se producen las inundaciones.

Datos meteorológicos

2.1.1.4 La frecuencia de los caudales máximos de crecida, las corrientes máximas probables y los hidrógrafos correspondientes se calculan a veces utilizando datos meteorológicos. Para hacerlo es necesario conocer la causa de la crecida, que generalmente se presume han de ser precipitaciones tempestuosas o la fusión de nieve, o a veces ocasionalmente una combinación de ambas causas. Los métodos utilizados dependen de la existencia de una relación entre los fenómenos meteorológicos y los caudales resultantes de la crecida fluvial. Estos métodos se bosquejan más adelante, al tratar de la metodología del pronóstico de crecidas (página 34). La única diferencia entre el empleo de estas relaciones para la estimación de crecidas y su utilización para el pronóstico de crecidas es el carácter de los datos meteorológicos iniciales. Para el pronóstico de crecidas, desde luego, es necesario utilizar la información de observaciones corrientes. En el caso de estimación de crecidas, los datos meteorológicos son de naturaleza probabilística. Por ejemplo, en las crecidas provocadas por lluvias, es necesario partir de hipótesis relativas a la frecuencia de la incidencia de intensidad de precipitaciones, su duración, su distribución zonal y la humedad inicial del área de captación de aguas, que influye en el volumen de la escorrentía. La estimación de las crecidas por fusión de nieve (sin datos hidrométricos) implica partir de hipótesis relativas a la cantidad de nieve depositada en el área de captación, la temperatura atmosférica y también la humedad inicial del área de captación, y asimismo sobre si las capas u horizontes superiores del suelo estarán helados.

El empleo de técnicas meteorológicas para la estimación de las inundaciones adolece de una mayor incertidumbre en cuanto a las respuestas que los métodos basados en los datos hidrométricos. No obstante, tienen aplicación en particular en las cuencas fluviales menores y especialmente en las áreas urbanas de captación de aguas, donde los cambios en el aprovechamiento de la tierra podrían modificar

en determinado momento el régimen hidrológico. Los métodos basados en datos meteorológicos proporcionan antecedentes útiles para estimar los niveles o caudales máximos posibles de crecida. En los ríos con mareas, por ejemplo, cuando una sobreelevación del nivel inducida por el viento sumada a las condiciones de marea equinoccial pueden constituir una posibilidad de suma gravedad, la maximación de la sobreelevación del nivel por el viento mediante el análisis de las velocidades observadas del viento pueden proporcionar información muy útil sobre los niveles máximos probables del agua en un estuario.

Morfología fluvial

2.1.1.5 En ocasiones, y en particular cuando no se dispone de datos hidrometeorológicos, puede ser útil para la estimación de las inundaciones el concepto de régimen aluvial (las características de autoformación de los cauces fluviales aluviales). Existe el concepto de que el volumen y frecuencia del caudal de crecida tiene que influir de algún modo en la forma y dimensiones del cauce de un río, sobre todo, claro está, cuando la corriente llena por completo el álveo. En ciertas regiones se ha puesto de manifiesto que cuando el agua llena el cauce, se obtiene un caudal máximo aproximado con una frecuencia que oscila entre 1 en un año y 1 en cinco años. La estimación hidráulica del caudal con el álveo lleno o un valor computado directamente puede utilizarse por consiguiente en ciertas circunstancias y en combinación con un coeficiente calculado objetivamente o deducido intuitivamente de $\frac{Q_T}{Q}$ respecto de cualquier período de retorno de T años, para calcular los

valores Q_T en un determinado tramo del río. La conversión de este caudal en la altura equivalente de la corriente se efectúa utilizando métodos hidráulicos. La técnica sólo da resultados de carácter aproximado y todavía se necesitan muchas investigaciones para mejorarla; no obstante, si la utiliza un hidrólogo experimentado, sobre todo si está versado especialmente en las características hidráulicas y morfológicas de los ríos aluviales, puede proporcionar una guía de suma utilidad respecto del alcance y gravedad de una crecida fluvial.

El hidrólogo podría facilitar información sobre la estacionalidad de las crecidas, pero esto dependerá muchísimo del régimen hidrológico del área de captación de aguas de que se trate. El clima y las dimensiones del área de captación son muy importantes a este respecto. Por ejemplo, los grandes ríos que drenan cuencas situadas en regiones de fuerte estacionalidad de precipitación y de fusión de nieves dan corrientes predecibles de crecida de larga duración, con tiempos de incidencia de caudal máximo bastante previsibles. Pero no ocurre así con las superficies pequeñas de captación, aunque incluso en ellas la incidencia de crecidas podría ser estacional, pero su incidencia dentro de la estación podría distribuirse en forma aleatoria; también resultarían posibles igualmente otras crecidas aleatorias fuera de la estación de "crecidas". La existencia de datos hidrológicos y de un buen conocimiento de las condiciones locales son factores decisivos para comprender los criterios de estacionalidad.

Evaluación del riesgo

2.1.2 La evaluación del riesgo es, en sentido estricto, la evaluación de los daños y pérdidas potenciales de vidas humanas debidos a las crecidas fluviales.

Una evaluación total del riesgo exige una variedad de conocimientos especializados y sólo es posible cuando se han identificado y calculado todos los criterios de riesgo previamente identificados. En muchas regiones desarrolladas esa evaluación se basa frecuentemente en un análisis de los costos del daño potencial. Ahora bien, en las regiones en desarrollo, el costo de los daños rara vez resulta adecuado como criterio.

Es muy frecuente que la evaluación se reduzca a la estimación de los criterios de riesgo exclusivamente, y en su forma más sencilla, el riesgo de crecidas se traza en el plano mediante líneas que representan el área de extensión de la superficie de agua. Se indican también los perfiles longitudinales de la superficie de agua. Estos perfiles de superficie de agua se determinan tanto para crecidas de frecuencia de incidencia especificada como para los acontecimientos históricamente registrados o calculados de magnitud catastrófica. Cuando van provistos de anotaciones suficientes y pertinentes, los planos de riesgos de inundaciones sirven para indicar a los planificadores la gravedad potencial de la inundación.

Los perfiles de la superficie del agua se deducen frecuentemente de las estimaciones de las crecidas y se determinan mediante el examen de barras dentadas de marcación y cuestionarios. También es un método eficiente para determinar los límites de la crecida fluvial la fotografía aérea (y ahora la fotografía por satélites). Cuando no existe o es muy escasa la información procedente de tales actividades, es necesario recurrir a un análisis hidráulico detallado para determinar los probables perfiles de la superficie del agua. Para ello es indispensable un conocimiento a fondo de la hidráulica fluvial.

Otra posible solución sería construir un modelo hidráulico físico de todo el tramo del río y de la llanura de inundación, completado con una representación de las construcciones de estructuras y otros elementos de desarrollo, y estudiar, para utilizar este modelo, el comportamiento hidráulico de la región cuando se halla sometida a diversos caudales máximos de crecida. Los problemas que se plantean para utilizar tales métodos estriban en su comprobación y en la extrapolación del efecto de escala, pero estos problemas pueden resolverse en gran medida, por lo que se puede utilizar el modelo para evaluar los perfiles de la superficie anegada por el agua y la distribución de velocidades. No es necesario que los modelos hidráulicos relativos a los problemas de crecidas se establezcan en la región afectada. Podría hacerse, y así se hace frecuentemente, en uno de los varios excelentes laboratorios hidráulicos internacionales que tienen ya reputación por su labor en la solución de complejos problemas hidráulicos.

El factor aleatorio de la velocidad del agua merece especial atención puesto que rara vez se obtienen datos para su evaluación durante el proceso de estimación de la crecida, y lo más frecuente es que sea difícil prever su valor. En época de crecida, suele ser elevada la velocidad de la corriente (aunque no siempre) y es irregular su distribución por el río y por la llanura de inundación, hasta tal punto que pueden producirse a veces contracorrientes. Los puntos de ataque de las velocidades altamente erosivas, las fuerzas hidrodinámicas excesivas en los soportes de los puentes y en los edificios y el aflujo de los niveles de agua debido a la obstrucción permanente o temporal en la zona de desagüe de la crecida constituyen todos efectos graves de la velocidad del agua. Pueden producirse desastres como resultado directo de esta sola causa.

Es casi imposible prever todos los desastres relacionados con las crecidas fluviales. La experiencia indica que existen riesgos imprevisibles. Un buen diseñador y planificador se esfuerza por tener todo esto en cuenta y adopta márgenes de seguridad que dan capacidades de cálculo en exceso sobre los límites estimados de crecida. El margen de seguridad previsto es de ordinario nominal, pero puede relacionarse con posibles riesgos, tales como el efecto de un oleaje de inundación causado por la destrucción de un terraplén contra inundaciones o por el efecto del aflujo en el nivel de agua debido al bloqueo en el vano de un puente o al amontonamiento de témpanos.

CONTROLES DE INGENIERIA

2.2 Los métodos de ingeniería reducen los efectos de las inundaciones, bien atenuando los caudales máximos mediante el embalse del agua (método a) y c), página 6) o bien encauzando el agua de inundación por vías naturales o artificiales, métodos de encauzamiento (métodos b), d) y e), página 6). Su diseño se basa habitualmente en su rendimiento teórico cuando están sometidos a una "crecida de cálculo". El diseño de los esquemas de embalse exige que la crecida de cálculo se especifique en un hidrógrafo completo de inundaciones, en tanto que en los métodos de encauzamiento sólo se requiere de ordinario conocer el caudal máximo. En ambos tipos de diseño, el caudal máximo se elige con respecto a una frecuencia de incidencia dada y los valores se calculan mediante uno o más métodos de estimación de las inundaciones.

La frecuencia elegida depende de las consecuencias de la rotura. Las obras de protección que tienen como base el costo-beneficio y cuya rotura no acarrea consecuencias desastrosas se diseñan habitualmente en relación con caudales máximos con frecuencias que oscilan entre 1 en 10 años a 1 en 50 años. Las obras de mayor importancia, como las presas, cuyo fallo en su efecto de protección podría tener consecuencias catastróficas y causar posiblemente pérdidas de vidas, se proyectan frecuentemente para que protejan contra caudales máximos extremos o un alto porcentaje de los mismos. Los aliviadores de las presas, por ejemplo, se diseñan a veces teniendo en cuenta las entradas máximas al embalse. La elección efectiva del período de retorno se basa en la experiencia y en la intuición. No obstante, en regiones desarrolladas se ha intentado efectuar análisis rudimentarios de costo-beneficio de las obras de protección contra las inundaciones, pero esa clase de análisis podrían no ser aplicables a las regiones en desarrollo. En estas regiones parece en general más adecuado el análisis de costo-eficacia.

En muchos de los grandes sistemas fluviales, es muy frecuente que sólo sea viable un control eficiente de las crecidas en un país cuando se ha establecido también en un país adyacente (por ejemplo, el control aguas arriba de las crecidas para mitigar las inundaciones en un tramo fluvial aguas abajo). Esto exige con frecuencia acuerdos y cooperación internacionales, y más en especial cuando las obras de control aguas arriba sirven también para complementar los recursos hídricos de la región aguas arriba, a la que no afecta en general en forma importante el problema de las crecidas fluviales.

Embalses

2.2.1 El diseño de los planes de almacenamiento de agua y en particular de los embalses, depende de que ese almacenamiento vaya a ser controlado o incontrolado.

Almacenamiento en embalses controlados e incontrolados

2.2.1.1 Corrientemente se cree que el almacenamiento de agua es idéntico cuando se efectúa con compuertas o sin compuertas. Esto, sin embargo, es un grave error y puede provocar graves consecuencias en el control de las crecidas por medio de embalses.

Es cierto que un embalse plenamente controlado debe tener un orificio de salida con compuertas, pero una salida con compuertas no garantiza automáticamente un control pleno del agua embalsada. Para que el embalse esté plenamente controlado, la capacidad de salida correspondiente al almacenamiento cero tiene que ser igual o mayor que la tasa posible máxima de entrada. Si no se cumple esta condición, no puede impedirse que se llene el embalse cuando es elevado el caudal de entrada y es limitado el control sobre la tasa de llenado, una vez que el volumen de entrada excede de la capacidad de salida. Por consiguiente, el grado de controlabilidad del embalse depende de la capacidad de los orificios de salida, que desde luego deben ir provistos de compuertas.

Por otra parte, en la mayor parte de las presas, el almacenamiento de agua por encima de la cresta del aliviadero no está enteramente incontrolado, incluso si el aliviadero no tiene compuertas. La razón de esto es que, por regla general, la presa tiene un túnel de salida con compuertas en el fondo del embalse y que al accionar estas compuertas puede controlarse parcialmente el llenado del embalse por encima de la cresta del aliviadero. También en este caso el grado de controlabilidad depende de la capacidad del túnel de salida con compuertas en el fondo del embalse. Sin embargo, aquí el control no puede ser nunca completo porque incluso cuando está cerrado el orificio de salida no puede impedirse el vaciado del embalse por encima de una cresta de aliviadero sin compuertas.

El embalse de detención controlada (regularización de crecidas) es el medio más eficiente de reducir los caudales máximos de inundación, porque en este caso la reducción a cierta corriente Q_k (corriente inocua) exige un mínimo de capacidad de embalse que es igual al volumen de la crecida por encima del caudal Q_k . En la Figura 2.4 este volumen se indica con A y la correspondiente salida ideal en el hidrógrafo es Q'_A . En este caso el almacenamiento de detención puede vaciarse (y prepararse para la próxima crecida) dentro de un tiempo t_A después de que la corriente de entrada haya descendido por debajo de Q_k , lo que asimismo representa el tiempo más breve posible (el tiempo efectivo de vaciado es ligeramente superior puesto que la reducción de la corriente de salida de Q'_A a Q nunca es instantánea).

Si la misma reducción del caudal de crecida hubiera de conseguirse mediante un embalse incontrolado, el almacenamiento requerido sería $A + B$ (Fig. 2.4). La porción B es inefectiva hidrológicamente, puesto que se desperdicia en la reducción de las corrientes que no tienen que ser reducidas, período $\bar{t}_0 \bar{t}_k$, y en la reducción innecesariamente alta de corrientes, período $t_k t_h$. Naturalmente, el tiempo que se necesita para vaciar el embalse, t_{A+B} , es mucho mayor que t_A .

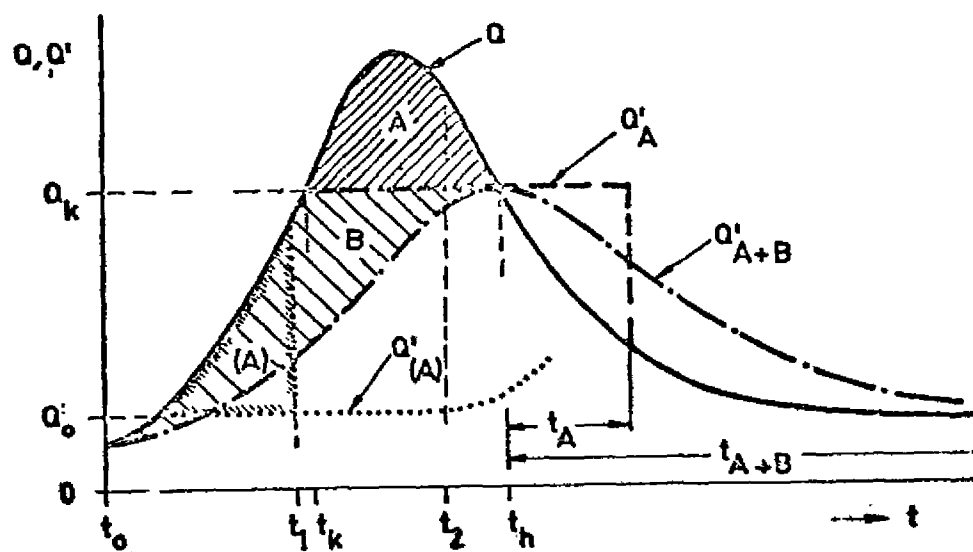


Figura 2.4 - Eficacia comparada del embalse de detención controlado e incontrolado, indicado en forma de hidrógrafo

La primera condición necesaria para la eficacia de un embalse controlado es, desde luego, una capacidad suficiente de los orificios de salida con compuertas, que han de tener al menos un valor Q_k . Si fueran inferiores, por ejemplo, Q_0 , podría llenarse por completo el embalse de detención, incluso antes de que el caudal de entrada alcanzara la corriente nociva Q_k (tiempo t_1 en la Fig. 2.4) y no quedaría almacenamiento de detención. En la práctica el embalse seguiría llenándose hasta que el nivel del agua alcanzara la coronación de la presa en el tiempo t_2 ; toda la coronación de la presa funcionaría como un aliviadero sin compuertas (véase el valor $Q' (A)$ en el hidrógrafo de la Fig. 2.4) y la submersión podría causar la destrucción de la presa.

La segunda condición es que las compuertas sean accionadas de manera que se impida el llenado del embalse de detención antes de que la corriente de entrada alcance el valor Q_k . Para que se cumpla esta condición es necesario un alto sentido de la responsabilidad y gran resistencia física del personal de operaciones (en servicio permanente durante el peligro de inundación) así como mecanismos de compuertas y un suministro de energía de alta seguridad.

En términos generales, una mayor eficiencia del almacenamiento controlado, en comparación con el almacenamiento no controlado, se consigue siempre a expensas de la seguridad global. Por consiguiente, el sistema usual en las presas es: 1) que haya al menos un aliviadero de "emergencia" sin compuertas, cuya cresta no esté a mayor altura que la elevación del nivel máximo de crecida normal en el almacenamiento de detención controlado; 2) que el "francobordo" o altura de margen de seguridad (la distancia vertical entre el nivel máximo normal de crecida y la coronación de la presa) sea al menos de un metro más de lo necesario para que pase la crecida total de cálculo sobre el aliviadero de emergencia.

Diseño de un embalse para control de crecidas

2.2.1.2 La principal diferencia conceptual entre el diseño de un embalse para la regulación de corrientes de regímenes de agua y las que tienen como fin el control de crecidas, estriba en que en el primer caso se tienen en cuenta los períodos en períodos sucesivos de escasez de agua y se utiliza como base la totalidad de la serie cronológica del registro hidrométrico, en tanto que en el segundo caso se toman en consideración las crecidas sucesivas de suficiente duración para dar salida al agua almacenada y la capacidad de almacenamiento se determina tomando como base una sola crecida.

La razón de que no se tengan en cuenta los períodos entre las crecidas es que se parte de la hipótesis de que el tiempo que se necesita para vaciar el embalse de detención es siempre mucho más corto que el período más breve previsto entre dos crecidas de magnitud comparable a la crecida de cálculo. Aunque esto es lo que suele ocurrir, existen ciertas condiciones climáticas en las que es razonable esperar que se produzcan dos tempestades importantes en rápida sucesión (normalmente, las zonas azotadas por ciclones tropicales, como tifones y huracanes). En tales casos no puede prescindirse del lapso de tiempo entre las crecidas.

La capacidad de almacenamiento de un embalse con sistema de detención no controlada se diseña por un método de relación embalse-curso de entrada. Conociendo el caudal de la corriente máxima deseada aguas abajo Q_k , calculamos el curso de

entrada de la crecida de cálculo al embalse, dando por supuesto un cierto tamaño y forma de los desagües, y comparamos el caudal máximo del hidrógrafo de salida, $Q'_{\max}$, con Q_k . Vamos modificando luego el tamaño y la forma de los desagües hasta que $Q'_{\max} = Q_k$. La capacidad requerida de almacenamiento la da el valor $S_{\max}$ correspondiente a $Q'_{\max}$ en el trazado de la curva del curso de entrada.

La capacidad de almacenamiento de detención controlada podría hallarse fácilmente en teoría haciéndolo igual al volumen de la crecida de cálculo por encima del caudal Q_k . Sin embargo, este sencillo procedimiento tiene un defecto que consiste en el hecho de que el período de retorno de la crecida de cálculo está relacionado por regla general con su corriente máxima y no necesariamente con su volumen. Por otra parte, la capacidad de almacenamiento de detención depende aquí exclusivamente del volumen de la crecida, por ser irrelevante el caudal máximo. Por esta razón, si se necesita una protección N-año frente a cierto caudal Q_k , el volumen de la crecida de cálculo N-año no da la respuesta correcta salvo que se haya establecido el valor N-año sobre la base de los volúmenes y no de los caudales máximos, como suele ocurrir.

Un hecho que surge con frecuencia es que el almacenamiento que se necesita para una protección relativamente elevada, de ordinario no es mucho mayor que el almacenamiento para una protección comparativamente pequeña. Esto es importante para la práctica del diseño allí donde, como resultado de la optimización, el grado óptimo de protección suele ser relativamente bajo. Aunque no hay razón para aumentar el grado de protección a menos que esté suficientemente justificado, el diseñador deberá considerar también las limitaciones en la exactitud de los datos económicos en los que se basa la optimización y sopesarlos con el costo de la protección adicional, especialmente si la carga óptima computada no está bien definida.

Control de las crecidas mediante embalses de finalidades múltiples y embalses múltiples

2.2.1.3 En casi todos los embalses de finalidades múltiples, una de sus funciones es el control de las crecidas y a estos efectos está previsto el embalsamiento de detención. Este almacenamiento se proyecta de la misma forma que la descrita en el párrafo precedente.

No obstante, un embalse de finalidades múltiples con una capacidad determinada de almacenamiento de detención puede brindar una defensa contra las inundaciones más eficiente que un embalse del mismo volumen de almacenamiento de detención cuya finalidad sea exclusivamente el control de las crecidas. El incremento de eficiencia es aproximadamente proporcional al almacenamiento de conservación del embalse de finalidades múltiples cuyo efecto de control de crecidas se debe al hecho de que la capacidad de almacenamiento de conservación no suele estar colmada al empezar una crecida, y la porción vacía puede utilizarse como complemento ad hoc para el almacenamiento de detención. No ha de dejarse al azar la disponibilidad de esta capacidad adicional de almacenamiento y de ordinario se incluye en las normas operacionales del embalse. Su magnitud en una determinada época del año depende de las fluctuaciones estacionales del caudal y se determina mediante un análisis estadístico del mismo.

La mejor manera de proceder a una evaluación cuantitativa del efecto adicional del almacenamiento de conservación sobre el control de crecidas es aplicar el método de simulación Monte Carlo del funcionamiento de embalse. Pero en la práctica corriente del diseño no suele evaluarse este efecto y se le considera como un margen incrementado de seguridad.

El control de las crecidas mediante un embalse de finalidades múltiples es un problema demasiado complejo para que pueda describirse adecuadamente en un breve párrafo; las complejidades son de naturaleza hidrológica y de administración de los recursos hídricos. Los principios enunciados para el diseño del embalse simple se aplican asimismo al control mediante embalses múltiples, pero también a este respecto el problema adquiere un carácter analítico complejo y las normas operacionales habrían de ser análogamente complejas. Existen procedimientos avanzados para evaluar las normas operacionales en tales casos. Las normas operacionales dependen a la vez de la experiencia y del método que se emplee para el pronóstico de las crecidas.

Obras de encauzamiento

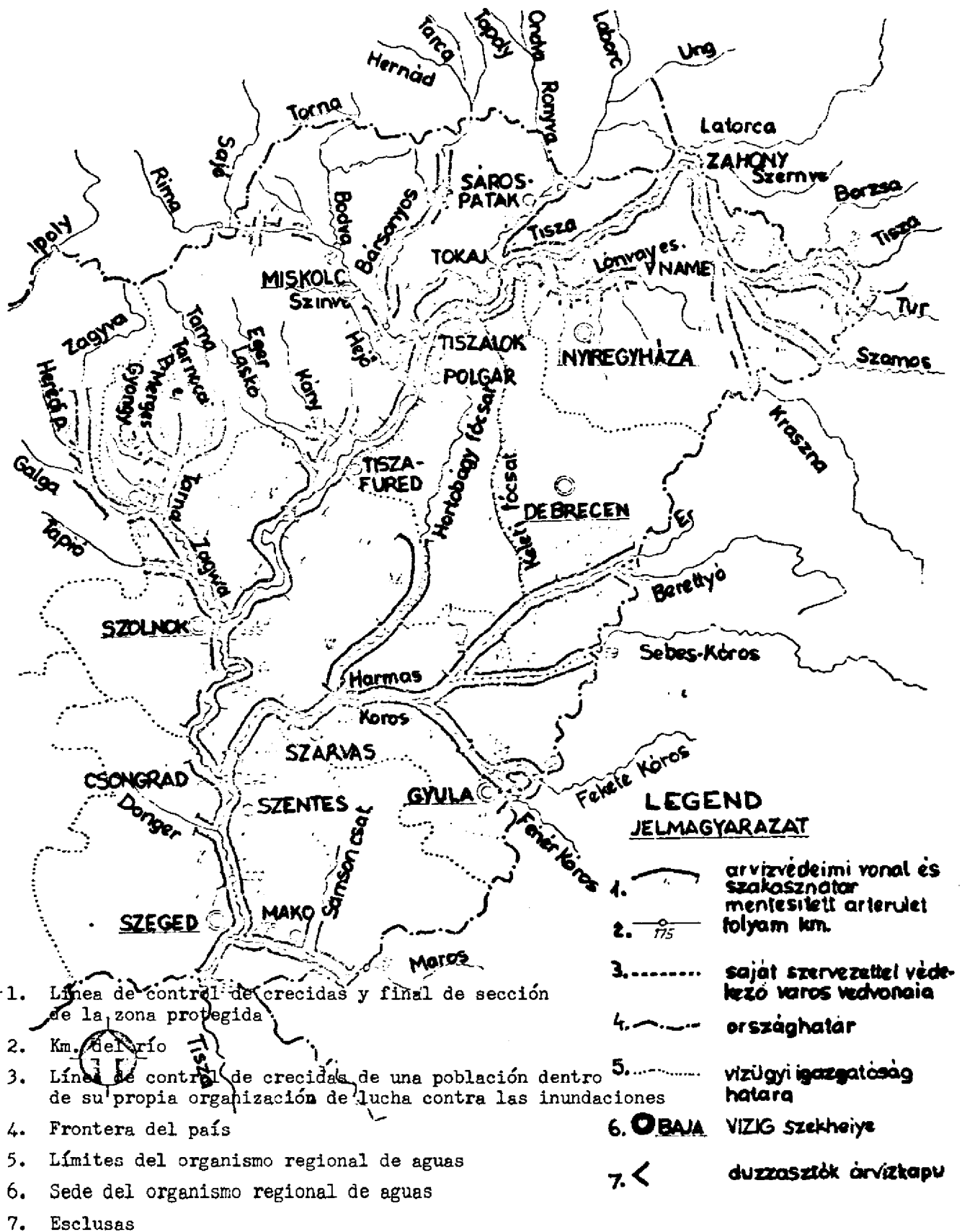
2.2.2 La construcción de malecones y diques de defensa es probablemente el método de ingeniería más reaccionario para proteger las llanuras de inundación. Ciertamente, es uno de los más popularizados y muchos grandes ríos continentales poseen un alto grado de control de las crecidas mediante este método (Fig. 2.5). Tiende además a ser más barato y en muchos aspectos más práctico que la ampliación del cauce y la construcción de canales de desviación. Los tres métodos de encauzamiento proporcionan una capacidad adicional de descarga del caudal; en el caso de los diques de defensa podría implicar un aumento del nivel del agua, en tanto que los sistemas de canales de desviación y el mejoramiento del cauce actúan con niveles iguales o más bajos de corriente.

Un efecto adverso de las técnicas de encauzamiento es la eliminación de la capacidad de almacenamiento natural de la llanura de inundación, la cual, antes de construirse las obras de regulación, puede atenuar considerablemente los caudales máximos al pasar la onda de crecida por el trecho fluvial correspondiente. Por consiguiente, si no se planifican cuidadosamente, los métodos de encauzamiento pueden desplazar los problemas de la crecida fluvial a una sección aguas abajo (probablemente no afectada anteriormente) al aumentar el caudal máximo de salida del tramo del río dotado de nueva protección.

Otra influencia, igualmente problemática, de las obras de encauzamiento y de almacenamiento es la de la sincronización de los caudales máximos. Los métodos de encauzamiento adelantan la aparición de caudales máximos aguas abajo; los métodos de almacenamiento, en cambio, retrasan el surgimiento de caudales máximos. También aquí, si no se investiga cuidadosamente con antelación, esto puede tener como resultado un marcado incremento de las corrientes aguas abajo de un afluente principal debido a la sincronización inducida de los caudales máximos del afluente y de los caudales máximos de la corriente principal. Un ejemplo de este fenómeno es el del río Rhin, en Alemania occidental, donde durante muchos años se han realizado diversas obras de regularización fluvial. El establecimiento de modelos analíticos (página 41) muestra que las ondas de inundación en la cuenca del río se han

Figura 2.5 - Sistema principal de control de crecidas en el valle del Tisza

TISZAVÖLGYI ÁRVIZVÉDELMI FŐVÉDVONALAK



acelerado, con un factor de multiplicación de 2 a 3 veces. El resultado neto es que si la gran inundación de 1882 volviera a producirse, el hidrógrafo, registrado con dos valores máximos, se combinaría en un hidrógrafo mucho más intenso con un solo valor máximo, lo que ocasionaría graves inundaciones aguas abajo del río afluente Necker (Véase la Fig. 3.5). El efecto se indica cualitativamente en la Figura 2.6.

Una vez elegido el caudal máximo de cálculo, el diseño de cualquiera de los tres métodos es básicamente un problema hidráulico para determinar la capacidad de caudal de las obras propuestas y los niveles de agua resultantes. Los métodos de encauzamiento tienden a ser más adecuados para los tramos inferiores de los ríos en que el control por almacenamiento es relativamente inviable.

CONTROL DEL APROVECHAMIENTO DE LA TIERRA Y OCUPACION DE LAS LLANURAS DE INUNDACION

2.3 La identificación y evaluación del riesgo de crecidas es un primer paso en la planificación del aprovechamiento de la tierra y de la ocupación de las llanuras de inundación. Es, no obstante, un paso muy importante puesto que proporciona a políticos y planificadores la información necesaria como base de sus decisiones respecto al grado de control requerido y las consecuencias probables si ese control no es eficaz. En el desarrollo planificado para evitar las inundaciones desastrosas, además de las medidas de emergencia descritas en la sección 3, se pueden tomar en consideración tres aspectos principales:

1. El aprovechamiento urbano y rural de la tierra
2. El control de la ocupación de la llanura de inundación
3. Las especificaciones de construcción e impermeabilización

No se consideran en esta descripción los seguros y la aceptación de las inundaciones.

Aprovechamiento urbano y rural de la tierra

2.3.1 Las modificaciones en el aprovechamiento de la tierra pueden alterar notablemente el régimen hidrológico y por consiguiente el potencial de crecidas de las áreas de captación de aguas. Una de las mayores preocupaciones en la hidrología moderna es la carga de desagüe cada vez mayor que tienen que soportar los cursos naturales de agua debido al extenso desarrollo de zonas urbanas y los planes de drenaje de la tierra. Una simple deducción sugiere que una zona urbana incrementará el potencial de crecidas del área de captación como consecuencia de los factores siguientes: a) la reducción de la absorción global de las precipitaciones en la superficie del terreno, lo que produce mayores volúmenes de escorrentía; b) la reducción del tiempo de concentración, que acelera grandemente la velocidad de la escorrentía; y c) la reducción de la capacidad de retención de la superficie y del tiempo de retraso inicial. Es factible la computación de los efectos del desarrollo urbano, y los resultados son con frecuencia alarmantes, pues indican en ocasiones aumentos de los caudales máximos comparados, de diversos órdenes de magnitud, a medida que prosigue la intensificación urbanística. El problema se hace aún más crítico por el aumento correspondiente en el potencial de pérdidas de vidas y bienes debidas a la urbanización.

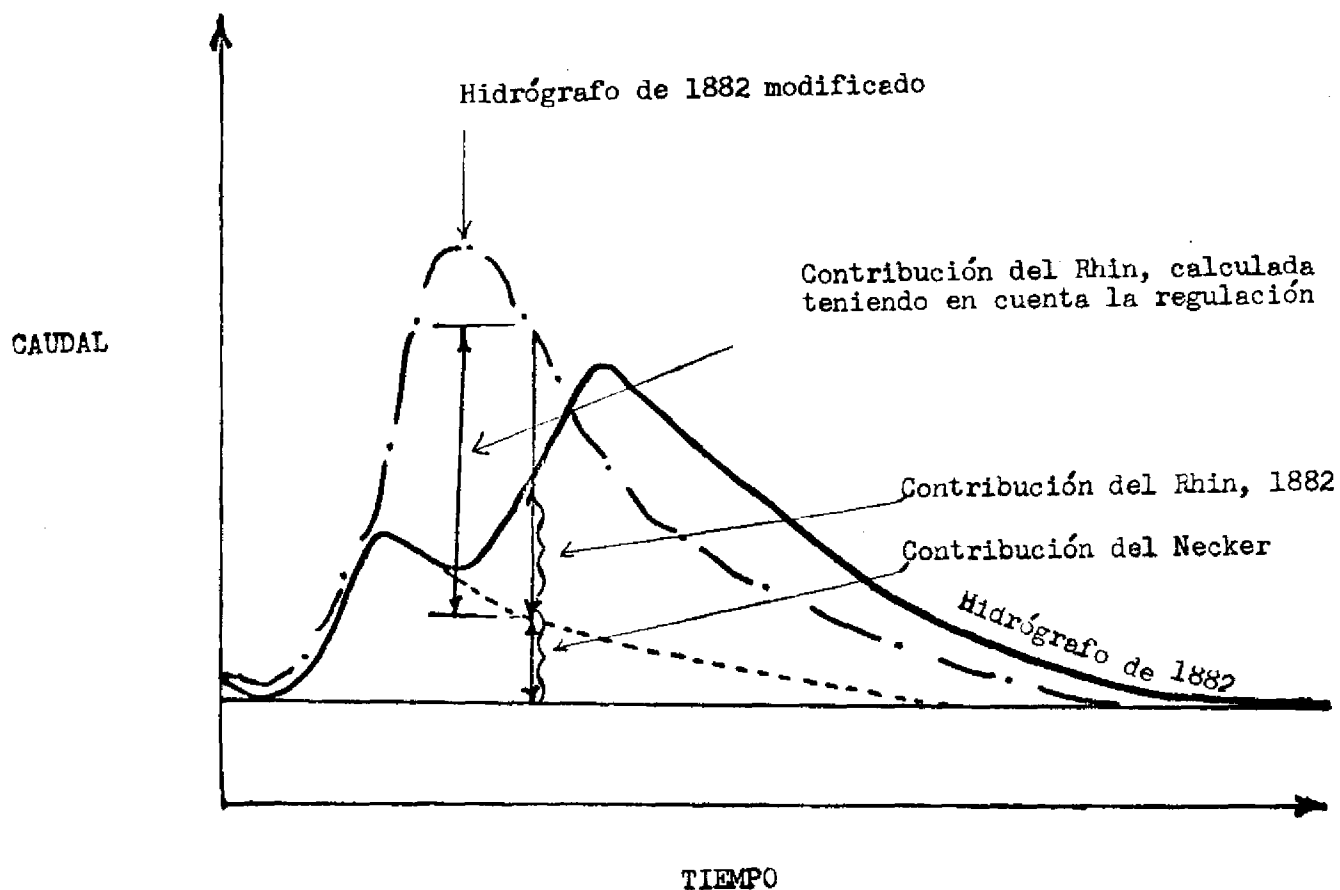


Figura 2.6 - Efecto relativo que habrían tenido las obras de regulación fluvial en el hidrógrafo registrado de la crecida de 1882 en el río Rhin, computado mediante un modelo hidráulico digital

Además del incremento de la intensidad del caudal, otro efecto trágico de estos cambios, si no se toman medidas para remediarlo, es la destrucción del propio cauce de desagüe. Las diferencias de arrastre y acreción para acomodar los caudales mayores, ocasionan la inestabilidad de las márgenes del río y una posible socavación de las construcciones en sus orillas, y cuando esto ocurre el exceso de materiales en el río podría provocar la repleción o el bloqueo y el consiguiente aflujo, temporal pero nocivo, del agua superficial. Por consiguiente, es indispensable que se prevean estos problemas en el desarrollo urbano. No hay que menospreciar este aspecto.

La Figura 2.7 presenta un buen ejemplo de este efecto. Se indica en ella que, con respecto a distintos grados de urbanización, clasificados de A a D, el caudal máximo unitario puede aumentar hasta seis veces si se compara con una superficie de captación de aguas no urbanizada. Sin embargo, este marcado efecto está limitado a las pequeñas áreas de captación de aguas. En grandes superficies el efecto no es tan notable y la influencia urbana podría no ser evidente en una gran extensión. Tampoco tiene la misma importancia cuando se producen acontecimientos extremos.

Los cambios en el aprovechamiento rural de la tierra surten efectos similares; el incremento de los sistemas de drenaje de la tierra aumenta los caudales máximos, y la modificación de la cubierta vegetal ocasiona la variabilidad de la respuesta a las crecidas del área de captación. Las pruebas documentales de estos efectos no son tan concluyentes como en el caso del desarrollo urbano. Al parecer, los usos principales de la tierra que se han investigado son la repoblación forestal y la deforestación. En los Estados Unidos de América, por ejemplo, se ha demostrado que con un aumento de la repoblación forestal en una pequeña cuenca hidrográfica, los caudales máximos equivalentes se han ido reduciendo durante un período de 25 años aproximadamente en un valor medio del 60%. En la URSS ha quedado demostrada una reducción similar y se ha puesto de manifiesto que en un medio con fusión de nieves una superficie del 50% aproximadamente de cubierta forestal parece ser la situación óptima para reducir los caudales máximos, debido a las diferencias de los períodos de fusión de nieves en los terrenos abiertos y las tierras forestales.

Aún no se comprenden claramente los efectos generales de este factor sobre las crecidas causadas por lluvias. Una diferente vegetación y ordenación de la tierra rural ocasiona diferencias en el consumo de agua por el suelo y en el retraso de la escorrentía. En muchos casos, las obras de drenaje, como las pequeñas zanjas superficiales en las zonas forestales, pueden ocasionar un aumento de la velocidad de la escorrentía e inducir a confusión respecto de los efectos globales.

Ocupación y control de las llanuras de inundación

2.3.2 El riesgo de inundación normalmente va reduciéndose a medida que aumenta la altitud de la superficie terrestre en relación con el nivel de la margen del río. Con la excepción de los diques de defensa naturales o artificiales, la existencia de depresiones debidas a antiguos cursos de agua, etc., suele significar que el riesgo de inundación tiende a disminuir a medida que aumenta la distancia del río. Por consiguiente, si por razones sociales o económicas no puede evitarse que se ocupe la llanura de inundación, lo racional es sugerir que se controle y limite

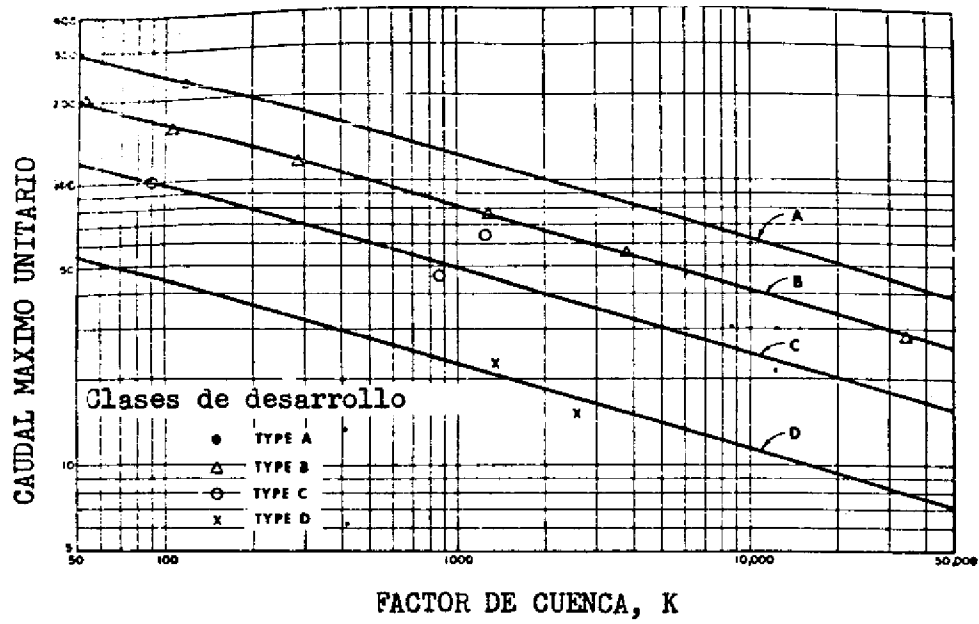


Figura 2.7 - Efectos del desarrollo en una cuenca hidrográfica sobre los caudales maximos

en lo posible a las zonas de la llanura de inundación que entrañan un riesgo menor. Esta idea ha originado el concepto de zonificación de las llanuras de inundación.

Teniendo en cuenta la variabilidad del riesgo de inundación en una llanura de inundación, se han establecido zonas, en primer lugar para identificar el diferente grado de peligro y de daños potenciales, y en segundo lugar para delimitar por medio de medidas legislativas, el tipo y la densidad de ocupación. Existen muchas variedades de zonificación que pueden aplicarse, pero la que se bosqueja en las Directrices para la prevención de desastres* con el fin de generalizar la idea básica es racional y sirve para explicar de modo más completo la idea. Se han identificado tres zonas (Figura 2.8).

a) Zona prohibida

En aquella parte de la llanura de inundación que se considera como parte esencial del área de desagüe de las riadas, cuyas velocidades y caudales contribuyen en forma importante a la corriente total. No se permiten obras de desarrollo en esta zona, para evitar daños a las mismas o los efectos adversos de la crecida aguas arriba que afectarían a otros ocupantes de la llanura de inundación. Su utilización es predominantemente de tipo no estructural, como pastos del ganado.

b) Zona restringida

Es la zona de la llanura de inundación donde no son demasiado frecuentes las inundaciones y que contribuye poco al caudal total de riada; las velocidades son bajas. El desarrollo limitado de construcciones y una actividad agrícola planificada son factibles y probablemente convenientes, por estar proporcionadas esas modalidades del aprovechamiento de la tierra con el riesgo de inundación. En esta zona, la restricción se aplica no solamente a la densidad y utilización, sino también a los criterios de diseño, tales como el nivel mínimo de la planta baja permitido y las medidas permanentes en los edificios para hacerlos resistentes a las inundaciones. Los límites de esta zona están relacionados normalmente con el perfil de la superficie de agua en la inundación "de cálculo" (por ejemplo, un caudal máximo de crecida que se produce con una frecuencia media de 1 cada 100 años).

c) Zona de simple advertencia

Más allá del nivel de la inundación de cálculo y hasta el nivel máximo estimado de las crecidas, las inundaciones son sumamente raras y por tanto el potencial de desastre es insignificante. Por consiguiente, los que pretenden realizar obras de desarrollo en llanuras de inundación, son simplemente advertidos y asesorados sobre los riesgos que entraña, los niveles de seguridad de la planta baja, etc., y se les permite que procedan a evaluar por sí mismos si tiene cuenta ocupar la llanura de inundación. Por lo demás, las restricciones de otros tipos son escasas o nulas en relación con la prevención de desastres por la crecida del río.

* Directrices para la prevención de desastres, volúmenes 2 y 3. Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre, Naciones Unidas, Ginebra, 1976.

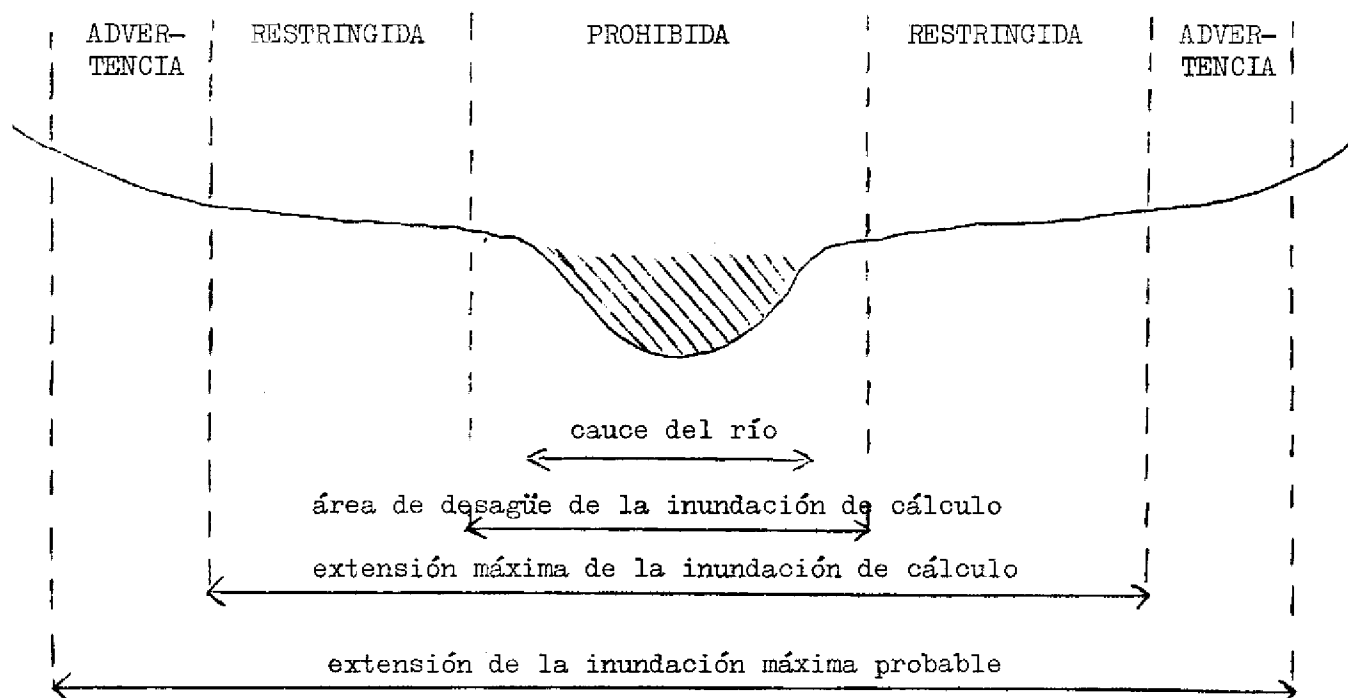


Figura 2.8 - Una llanura de inundación zonificada para la regulación del aprovechamiento de la tierra.

El hecho de imponer una ocupación zonalizada de la llanura de inundación en la forma arriba indicada contribuye a minimizar el riesgo de un desastre de inundación y prepara a la comunidad mediante un desarrollo planificado. Su identificación está asimismo relacionada con el tiempo necesario para la evacuación, y con las rutas de acceso y de evacuación (Fig. 2.9). Demuestra también la importancia de una evaluación bien preparada y exacta del riesgo de inundación y, por consiguiente, el motivo de haber dedicado cierto espacio del presente informe a describir brevemente este aspecto. (En un volumen por separado su exposición detallada de la zonificación).

Restricciones y reglamentación de la construcción

2.3.3 Esté o no zonificada la llanura de inundación, un medio efectivo para evitar daños y desastres en propiedades y estructuras determinadas es incluir en el diseño su capacidad para resistir a las inundaciones y las altas velocidades de la corriente. Las disposiciones legislativas para conseguirlo son útiles en cuanto protegen el bienestar de los individuos o de comunidades enteras, pero son especialmente beneficiosas cuando se incorporan a los reglamentos de zonificación de las