

## 2 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA Y DISEÑO DEL DRENAJE URBANO EN LA INGENIERÍA ACTUAL

### 2.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL DRENAJE URBANO

Las dos características más importantes de una cuenca urbana, en comparación con una rural, son el elevado porcentaje de superficie impermeable y la existencia de una red de drenaje artificial con puntos localizados de entrada de agua (*Narúa & Gómez, 2006*). Esta última característica condiciona la misma definición de la cuenca, ya que en el caso de la cuenca urbana, además de tener en cuenta el relieve superficial, hay que contar también con la red de drenaje, que puede no tener la misma pendiente o dirección de drenaje que el terreno.

Las escalas de trabajo también son diferentes en ambos casos, pues espacialmente el orden de magnitud habitual es de hectáreas en cuencas urbanas frente a kilómetros cuadrados; y la escalas temporales son mucho más cortas, pues los sucesos de lluvia tienen duraciones de horas y, consecuentemente, los intervalos de tiempo son del orden de minutos.

Por su parte, el porcentaje de impermeabilidad de una cuenca urbanizada hace que la infiltración sea reducida, lo que conduce a un aumento del volumen total de escorrentía. Además, al ser la red de drenaje la superficie donde se desarrolla la escorrentía, menos rugosa que en el medio natural, la velocidad del agua es mayor y los tiempos de concentración bajos. Estos dos factores conllevan caudales punta mayores en los hidrogramas de los sucesos de precipitación.

Además de estas características, para entender la actual problemática del drenaje urbano, hay que tener en cuenta el crecimiento notable del número de habitantes en las ciudades españolas (en Barcelona y su área de influencia, por ejemplo) en las últimas décadas. Este rápido crecimiento de la población se ha hecho especialmente patente en algunos municipios en los últimos años, debido a la elevada densidad urbana y la falta de suelo edificable en algunas ciudades, creándose movimientos migratorios muy importantes. La elevada demanda de viviendas en estos municipios (ceranos a grandes urbes, generalmente) está produciendo una mayor urbanización del suelo de los mismos.

Como resultado de este proceso, las redes de drenaje se ven obligadas a soportar nuevas cargas para las que no estaban dimensionadas inicialmente. Estas nuevas cargas son debidas, precisamente, a los efectos de la nueva urbanización, traducidos en forma de aceras de hormigón, pavimentos bituminosos y edificaciones, que provocan el aumento de la tasa de

impermeabilidad y reducen la rugosidad del suelo. La consecuencia es un flujo de agua que discurre con mayor rapidez y una pérdida de la capacidad de laminación natural de la cuenca, dando lugar a caudales punta mayores y con tiempos de concentración menores.

Si además se localiza este fenómeno urbanístico en el litoral mediterráneo, caracterizado por una pluviometría de lluvias muy intensas en cuencas pequeñas y con pendientes elevadas, que generan gran cantidad de escorrentía superficial, los fenómenos se combinan provocando frecuentes inundaciones con los daños materiales y pérdidas económicas (e incluso vidas humanas) que esto conlleva.

## **2.2 NIVEL DE SEGURIDAD EN EL DRENAJE URBANO. SITUACIÓN ACTUAL**

Una red de drenaje tiene por misión evacuar los caudales de escorrentía generados por la lluvia caída en medio urbano y permitir así el normal desarrollo de las actividades ciudadanas. Es evidente que cuanto mayores sean las dimensiones de la red, menor probabilidad tendrá de ver su capacidad de desagüe superada y, en consecuencia, menores serán los problemas de inundación en la superficie de la ciudad.

Como cualquier otra infraestructura que se desee diseñar, una red de drenaje plantea en primer lugar un problema de toma de decisión en cuanto al nivel de seguridad a utilizar en el diseño. Saber qué eventos de lluvia va a ser capaz de drenar la red, o qué volúmenes de agua serán vertidos al exterior y bajo qué circunstancias, son preguntas que deben formularse y responderse inicialmente.

El nivel de seguridad elegido tiene que ser función del coste de construcción de la red de drenaje y del coste provocado por el malfuncionamiento de la misma. No son concebibles pues diseños basados en situaciones máximas desfavorables (como ciertos criterios de diseño de grandes presas), dado que unos costes y otros no son equiparables. Es más, incluso si se pretendiese construir y diseñar una red de drenaje para alcanzar probabilidades de inundación casi nulas, no habría manera de considerar algunas circunstancias accidentales que provocasen el fallo de la red y la consecuente inundación (rotura o taponamiento de conductos, etc.).

Actualmente en ingeniería hidráulica, el criterio de selección del nivel de seguridad se suele realizar de acuerdo al concepto de periodo de retorno asociado a una precipitación o caudal (*Dirección General de Carreteras, 1990*), deducido de series pluviométricas más o menos fiables y a partir de hipótesis no siempre aceptables; trabajando con lluvias de proyecto, que por su origen sintético no representan la realidad pluviométrica que se está simulando; y sin considerar la incertidumbre del proceso de cálculo de la respuesta de la red de drenaje. Es decir, se trabaja con una metodología que alberga un grado de error no despreciable, que además no se cuantifica (sería deseable conocer el grado de incertidumbre con el que se trabaja). Conviene entonces prestar atención a

cuál es el proceso actual que se lleva a cabo, de forma generalizada, para un posterior replanteamiento, presentando algunas mejoras a estas prácticas habituales.

Periodo de retorno es un término habitual en la práctica de la hidráulica y la hidrología (también usado en otros ámbitos de la ingeniería civil), y que no siempre es usado correctamente. Se habla de periodo de retorno  $T$  asociado a un fenómeno de magnitud  $X$  (puede ser precipitación, caudal, altura de oleaje, magnitud de un sismo, etc.), cuando como media se presenta un suceso de magnitud igual o mayor que  $X$  una vez cada  $T$  años; o lo que es lo mismo, cuando el tiempo medio entre sucesos es  $T$  años. Esta definición es posible al suponer que los sucesos siguen un proceso de Poisson, tal y como se describe más detalladamente en el *Apartado 3.1*. Si además se tiene en cuenta la vida útil de la infraestructura, el nivel de seguridad se refiere a la probabilidad que se está dispuesto a aceptar, de que un número de sucesos de periodo de retorno  $T$  ocurran a lo largo de esa vida útil.

Sin embargo, es necesario indicar que en todo lo expuesto anteriormente, se está suponiendo implícitamente que el periodo de retorno asociado a un caudal (o más aún, al nivel de inundación en superficie) es idéntico al de la lluvia que lo genera. Es decir, se supone que lluvias de periodo de retorno  $T$  años generan caudales e inundaciones de igual periodo de retorno  $T$  años, lo cual no es razonable en un análisis de riesgo, pues se debe suponer que la respuesta del sistema de drenaje es una variable más del proceso de cálculo (no es un parámetro que se pueda considerar fijo y conocido, pues está sujeto a grandes incertidumbres). No obstante, esta suposición es más cierta cuanto más importante es el suceso de lluvia ya que en estas circunstancias la incidencia de factores y variables como la humedad del suelo, la capacidad de infiltración, las pérdidas por retención, etc. o incluso la incertidumbre de algunos parámetros tienen menor influencia en el resultado o respuesta de la red de drenaje. No ocurre lo mismo para lluvias de bajo periodo de retorno, pudiendo ser esta suposición un error no despreciable al elegir el nivel de seguridad de una red de drenaje, y más aún teniendo en cuenta que los diseños se hacen para niveles de riesgo elevados (periodos de retorno bajos).

Las condiciones y características para elegir un diseño u otro se deberían basar en un análisis de coste-beneficio, donde se enfrentasen los costes de construcción a los costes que provoca el fallo de la red de drenaje. Se puede plantear, para una red de drenaje, cuál es el coste asociado a la construcción de la misma, evaluando para una serie de lluvias de proyecto de diferentes periodos de retorno, las infraestructuras necesarias para el correcto funcionamiento en cada caso. Para cada uno de los diseños obtenidos, se calcula el coste de forma más o menos objetiva, utilizando siempre los mismos precios unitarios para las diferentes unidades de obra, en cada uno de los presupuestos. Como resultado se obtiene una curva de costes creciente con el periodo de retorno considerado.

Esta información se debe cruzar con la referente a los costes de los daños provocados por la falta de capacidad de la red durante su vida útil. Para ello se evalúan los daños causados por las posibles lluvias de mayor magnitud (mayor

periodo de retorno) a la de diseño de la red, caídas a lo largo de la vida útil. Cabe destacar aquí, que la dificultad de evaluación de los daños es muy elevada, igual que la estimación de los posibles sucesos de lluvia desencadenantes de inundaciones a lo largo de la vida útil. Estos daños aumentan cuanto menor es el periodo de retorno de diseño de la red, y disminuyen al subir el periodo de retorno de las lluvias empleadas para el diseño de la red de drenaje. Se trata, por tanto, de una curva decreciente.

El coste total de la infraestructura durante su vida útil es la suma de los costes de construcción y de los daños durante esa tiempo (podrían también incluirse los costes de mantenimiento y explotación). La suma de estos dos componentes da como resultado una curva cuyo mínimo señala el periodo de retorno más económico para el diseño de la red de drenaje.

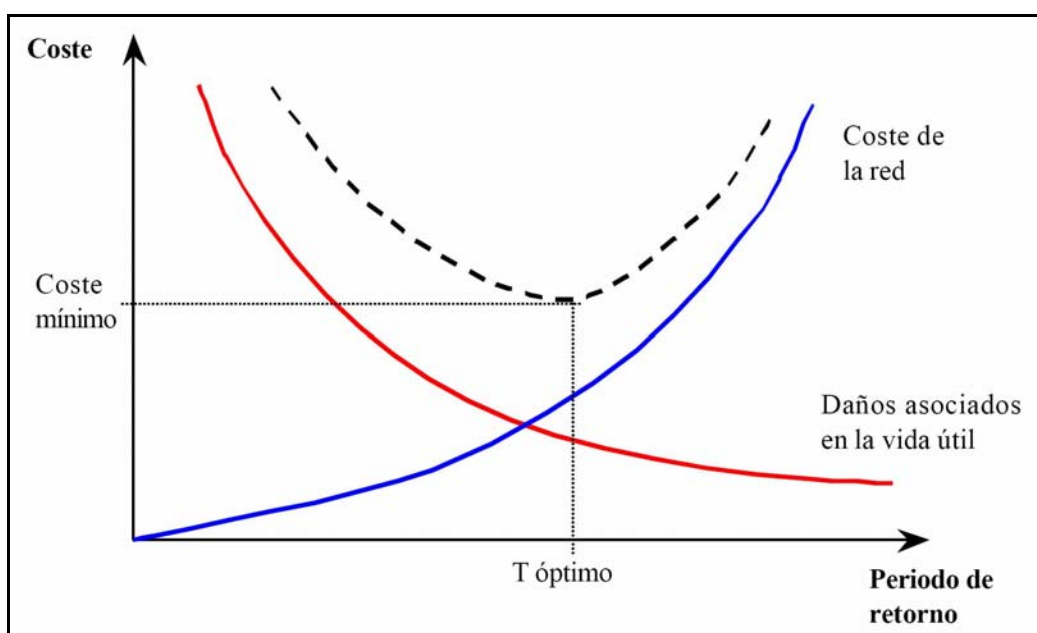


Figura 1. Análisis coste-beneficio para el diseño de una red de drenaje, en función del periodo de retorno asociado a una lluvia o caudal. Fuente: (Gómez, 2006).

Aunque un análisis coste-beneficio es un procedimiento sólido y congruente para el problema de decisión del nivel de riesgo, no se utiliza de manera habitual por los inconvenientes que presenta la evaluación de los daños y porque el uso de lluvias de proyecto de periodos de retorno  $T$  años para el diseño de las redes, no garantiza probabilidades de inundación de  $T$  años, siendo ese un planteamiento determinista de la respuesta del sistema.

Por un lado, se está avanzando en el estudio de los costes asociados a los daños, y existen proyectos de investigación en algunos países en la línea de permitir su utilización con bases de datos más ajustadas y fiables. Aún así, no es fácil objetivar los daños, pues aunque algunas valoraciones por parte de compañías de seguros o de servicios públicos sea una información muy precisa, los daños de carácter local o individual, derivados de los problemas en la vida cotidiana por falta de movilidad, accesos y tiempo perdido, son muy subjetivos.

A otro nivel, existe una necesidad, cada vez más presente, de utilizar en el proceso de diseño lluvias reales o de proyecto que representen la realidad del problema al que tiene que hacer frente la infraestructura. Muchas lluvias de proyecto, basadas generalmente en curvas IDF (no siempre con la validez necesaria), no representan la realidad meteorológica de una zona, o en caso de ser completamente sintéticas, tampoco han sido pensadas para el diseño de elementos singulares como depósitos de retención, por ejemplo. Se está empezando a introducir la utilización de patrones de precipitación, de series pluviométricas con numerosos eventos reales registrados, de estudios de tipo estocástico, donde las precipitaciones de un determinado periodo de retorno con sus estadísticos y sus distribuciones espaciales y temporales sean parte del proceso de diseño, intentando así corregir algunos de los problemas de planteamiento expuestos anteriormente.

A pesar de estos esfuerzos, se suele recurrir a fijar un periodo de retorno de referencia para los caudales de diseño (o las lluvias de diseño) a utilizar en el dimensionamiento y cálculo de la red de drenaje. A nivel nacional, no existe ninguna legislación que marque el periodo de retorno a considerar en el diseño de redes de alcantarillado, siendo las Administraciones locales las que establecen los criterios en cada caso. El valor más usual para las diferentes ciudades españolas es 10 años de periodo de retorno, alcanzando algunas los 25 años. También es práctica habitual aplicar criterios de mayor nivel de seguridad en zonas consideradas estratégicas (vías de evacuación, emergencia, etc.), llegando a 50 años de periodo de retorno.

En otros países los criterios establecidos varían en función de las hipótesis y consideraciones en cuanto al riesgo asumible. Por ejemplo, en los países nórdicos se apuesta por periodos de retorno más bajos (2 a 5 años), pero considerando que las calles y avenidas forman parte de la red de drenaje, transportando el agua por superficie; se asume y se comprueba que el agua circulará por las calles sin producir graves daños ni inundaciones localizadas, desaguando ese caudal en algún punto de un cauce natural, y permitiendo que esta situación ocurra varias veces al año. Esta situación requiere un diseño global complejo y no siempre factible. En Estados Unidos, donde prevalece el transporte por carretera, y donde la población es muy dispersa, con zonas no tan impermeabilizadas como en Europa, se intenta que las vías de comunicación se vean lo menos afectadas posible, aunque los criterios no son homogéneos, y dependiendo del estado o ciudad, varían desde 10 a 50 años de periodo de retorno. Alemania por su parte, prefiere plantear el problema en términos de frecuencia de entrada en carga de la red en base a precipitaciones históricas de series de unos 30 años, marcando como aceptables, frecuencias de inundación de entre 1 vez cada 1 y 5 años, dependiendo de los usos del suelo.

A nivel Europeo, se está realizando un esfuerzo considerable con tal de unificar los criterios en todo el territorio. Una prueba clara de ello es la Norma Europea EN-752 que, por lo menos parcialmente, ya han trasladado algunos países a su normativa interna (Francia, Alemania, Dinamarca, etc.). El cambio más importante que presenta esta normativa con respecto a sus predecesoras, es la introducción

del concepto de diseño de la red de drenaje en función de la frecuencia de inundación (frente al concepto de periodo de retorno asociado a una lluvia).

El resumen de la norma (EN-752, 1997) se recoge en la siguiente tabla:

Zona de estudio	Frecuencia de inundación
Área rural	1/(10 años)
Área residencial	1/(20 años)
Centro ciudad, zonas industriales y comerciales	1/(30 años)
Metro – pasos subterráneos	1/(50 años)

Tabla 1. Resumen de la norma EN-752.

Así pues, si hasta el momento se diseña en función del periodo de retorno de la lluvia caída, asumiendo que lluvias de periodo de retorno  $T$  años generan caudales e inundaciones de periodo de retorno de  $T$  años, ahora se promueve el criterio de diseño en función de la frecuencia de inundación, un concepto mucho más clarividente para la población y Administraciones. Aunque la primera suposición adquiere mayor validez para niveles de inundación muy elevados, y especialmente en medio urbano, donde las condiciones ambientales son mucho menos variables, el nuevo planteamiento no deja de ser un avance, que obliga a replantear y valorar algunas metodologías para el cálculo de riesgos, incluyendo la respuesta aleatoria del sistema. En cualquier caso, no se exige la evaluación de los costes asociados a las inundaciones y a la construcción, lo que sería necesario para un completo análisis de riesgo.

En general, la aplicación de estos criterios se basa en la utilización de métodos de cálculo que precisan de una información detallada y extensa de la pluviometría de la zona de estudio (series de lluvias históricas de 20 ó 30 años como mínimo), y de la que se carece en nuestro territorio, lo que sin duda, dificultará su aplicación de forma sistemática. En este aspecto, registros continuados como el del Observatorio Fabra en Barcelona, son interesantes para plantear un estudio en los términos expuestos anteriormente.

En este sentido, es necesario reflexionar sobre las lluvias empleadas para el dimensionamiento de nuestras redes de drenaje. En los últimos años las metodologías de análisis de redes de alcantarillado han sufrido una reevaluación en cuanto a las funciones de entrada (sucesos de precipitación, que serían la sollicitación hidráulica de la red). Los hietogramas de proyecto, que suelen definir las lluvias de proyecto, pueden desarrollarse para propósitos específicos, pues es diferente el hietograma de proyecto para el cálculo de la capacidad máxima de un colector, que el hietograma de proyecto que debe emplearse para el cálculo de un depósito de retención, aunque suele usarse el primero para todo tipo de fines.

Se puede decir que existen al menos 3 enfoques en cuanto a los *inputs* (precipitaciones) para el diseño de las redes de drenaje y sus distintos elementos: (1) utilización de bancos de datos de lluvia; (2) utilización de lluvias de proyecto; y (3) utilización de patrones de precipitación. Sin lugar a dudas, la utilización de

lluvias de proyecto es la práctica más extendida; desde lluvias triangulares, tipo Sifalda (Sifalda, 1973), tipo Keifer-Chu (Keifer, 1957), de doble triángulo, etc., hasta la habitual de uso en nuestro territorio, de bloques alternados a partir de las curvas IDF deducidas de las series pluviométricas pertinentes. Particularmente, se producen como mínimo dos errores en la derivación de una IDF (Vázquez, 1991): el primero corresponde al nivel de confianza empleado en la estimación del valor máximo para una frecuencia determinada, en base a la distribución teórica elegida y se podría llamar “error de extrapolación”, pues cuando se determina ese valor, se hace asumiendo un error que nadie explicita (puede ser una probabilidad de error cualquiera, no siendo extraño un 30 por 100); y el segundo error deriva de ajustar una curva de uso práctico a los valores obtenidos para cada intervalo, que se puede denominar “error de interpolación”, declarando finalmente la frecuencia de superación de un determinado valor sin explicar cuál es la fiabilidad de esa estimación.

Es evidente entonces, que este tipo de lluvias sintéticas de proyecto tal y como se emplean habitualmente, no consiguen representar la realidad meteorológica de la zona de estudio donde se diseña la red de drenaje y que añade una gran incertidumbre y resta validez a un análisis de evaluación de riesgo.

En definitiva, queda claro que las nuevas líneas marcadas a nivel europeo tratan de caracterizar mejor el nivel de seguridad para el que diseña, refiriéndose a la frecuencia de inundación; y que las técnicas y prácticas hidrológicas e hidráulicas empleadas en el cálculo de sistemas de alcantarillado en el medio urbano han avanzado y están sufriendo cambios notables recientemente, por lo que se pueden replantear algunas de las condiciones del diseño de redes de drenaje (lluvias de proyecto, periodos de retorno, etc.).

En este contexto, no es el objetivo, ni el alcance de esta tesina el cálculo o análisis completo del riesgo en una red de drenaje, pero sí intentar sentar algunas bases y conceptos que sirvan de camino previo a un análisis completo en estos términos.