

*Ana Deisy López Ramos*

## Introducción

EN SAN SALVADOR, así como en la mayoría de ciudades de El Salvador, y de muchas ciudades de Latinoamérica, la presión poblacional, la demanda de tierras y de servicios, las condiciones de la infraestructura urbana y la falta de planificación han incrementado de forma exponencial los riesgos por inundaciones, que ocurren no solamente en las zonas aledañas a los ríos, sino también en áreas de mayor altura topográfica por la inadecuada capacidad del drenaje de la ciudad.

En el año 2004, por ejemplo, varias comunidades sufrieron inundaciones, generadas por sistemas hidrometeorológicos no tan importantes y por precipitaciones no tan altas. De hecho, algunas de las inundaciones sufridas, se debieron a algún evento adicional de taponamiento de drenajes con desechos sólidos, sedimentos o flujo de sedimentos erosionados de lugares de mayor altura.

En mayo de 2004, por ejemplo, un sistema de baja presión y una vaguada en niveles superiores, que por su ubicación contribuyó al desarrollo de nubosidad convectiva provocó una precipitación de 23.6 milímetros, lo que favoreció una crecida inusual del río Acelhuate, afectando viviendas en San Salvador en las comunidades Tutunichapa N° 2, Núñez, finca Itsmania y colonia 3 de Mayo. Ese mismo día, un sistema de baja presión que se ubicó entre las costas nicaragüenses y salvadoreñas manteniéndose semiestacionario, provocó una precipitación de 51 milímetros, e inundaciones en los caseríos Chichipate y El Carao (siete viviendas), municipio de Intipucá, departamento de La Unión.

En el mes de junio varios sectores de la zona metropolitana de San Salvador fueron afectados por inundaciones debido a una precipitación de 56.3 milímetros: calle 29 de Agosto, colonia Nicaragua, comunidad Francisco Menéndez, barrio La Vega, colonia San Judas y comunidad Las Palmeras, bulevar Venezuela. En el mismo mes una fuerte correntada de agua, lodo y piedras cubrió las principales calles de la colonia Los Ángeles y caserío Ismatapa y penetró en una gran cantidad de viviendas, dejando cinco viviendas destruidas, tres personas lesionadas, cuatro vehículos inservibles y un número no cuantificado de daños materiales por una lluvia registrada de 38.7 milímetros.

Como puede observarse, niveles de precipitación que no son tan altos pueden generar desastres y una serie de pérdidas y daños en las comunidades, cuya ubicación las convierte en vulnerables. Es evidente, adicionalmente, que el drenaje urbano es insuficiente para drenar las aguas lluvias. Surgen entonces los interrogantes: ¿por qué ante precipitaciones de poco volumen están teniendo lugar hechos que pueden convertirse en desastres? ¿Ha cambiado la intensidad y el patrón de la lluvia? ¿O es que nos estamos volviendo más vulnerables? Las condiciones hidrometeorológicas extremas no son intrínsecamente catastróficas, ya que el medio natural tiene gran capacidad de recuperación, pero ¿el medio físico y social que hemos construido lo será?

## Marco teórico conceptual

### *Conceptos de gestión de riesgos*

¿Qué es amenaza? ¿Qué es riesgo? ¿Qué es vulnerabilidad? ¿Qué es desastre? Según O. D. Cardona la frecuencia y diversidad de amenazas naturales, la magnitud de los daños y pérdidas materiales y humanas asociadas con estas en los últimos años ha generado una reflexión y un debate sobre los factores ajenos a los eventos físicos en sí, que podrían ayudar a explicar los niveles de destrucción e impacto sufridos en la economía y sociedad. Una explicación en torno a esta reflexión es la llamada vulnerabilidad social o humana ante lo cual se hace necesaria la gestión en la reducción del riesgo.

En este sentido, amenaza se entiende como el peligro latente que representa la posible manifestación dentro de un período de tiempo y en un territorio particular de un fenómeno de origen natural, socionatural o antropogénico, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios y el ambiente. Vulnerabilidad, es el factor de riesgo interno de un elemento

o grupo de elementos expuestos a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado, de ser susceptible a sufrir un daño, y de encontrar dificultades en recuperarse posteriormente. Corresponde a la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un fenómeno peligroso de origen natural o causado por el hombre se manifieste. Riesgo es la probabilidad de que se presente un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un período de tiempo definido. Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Desastre es la situación o proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población, causa alteraciones intensas, graves y extendidas en las condiciones normales de funcionamiento de la comunidad, requiriendo de una respuesta inmediata de las autoridades y de la población para atender a los afectados y restablecer umbrales aceptables de bienestar y oportunidades de vida.

Según lo anterior, puede observarse que los eventos hidrometeorológicos que tienen un período de recurrencia anual, que no son de altas magnitudes y que pueden ser considerados como promedios o incluso bajo el promedio —considerados como amenaza cuando se relaciona con la vulnerabilidad y los cambios hechos por el hombre, ya que la precipitación en sí misma no es una amenaza—, han sido capaces de generar desastres para una población urbana considerable muy vulnerable. De ahí la importancia de conocer el ciclo hidrológico, el cual es la representación simplificada del paso del agua en la tierra.

### *Ciclo hidrológico y las presiones antropogénicas*

El proceso del ciclo hidrológico comienza con la energía que se recibe del sol. Los continentes y océanos pierden agua por evaporación, pasando ese vapor de agua a la atmósfera y condensándose en forma de nubes. La saturación del vapor del agua en las nubes conduce a las precipitaciones, las que se manifiestan en forma de lluvia, nieve o granizo, que alcanzan de nuevo los continentes y por tanto los ríos y océanos.

Del total de agua de las precipitaciones una parte circula por la superficie como escorrentía, otra se evapora y una tercera se infiltra en la tierra para formar el caudal base de los ríos, es decir, las aguas subterráneas que alimentan los caudales de los ríos cuando cesan las precipitaciones.

Las aguas que tienen su destino en las corrientes subterráneas procedentes de la lluvia, se infiltran por gravedad a través de los huecos hasta una profundidad límite, en la cual los poros rocosos están tan anegados o saturados que el agua no puede penetrar más. En el subsuelo se forman entonces dos zonas: una profunda (saturada) y otra llamada de aireación o vadosa (no saturada). En la zona de aireación se producen fenómenos de transpiración, por una lado debido a las raíces de las plantas, y por otro a causa del ascenso del agua por capilaridad desde la zona saturada hacia la superficie.

Cuando las aguas consiguen asomar a la superficie, sea por capilaridad o presión, pueden quedar bajo los efectos de la energía del sol, y por tanto seguirán de nuevo el ciclo hidrológico en otro estado físico.

El hombre a través de sus actividades altera el ciclo hidrológico en muchas formas. Es obvio que para su subsistencia y desarrollo debe aprovechar los recursos hídricos y con ello modificar el uso de la tierra y de los suelos. Cuando este aprovechamiento es desequilibrado los efectos de su alteración se evidencian físicamente convirtiéndose algunos casos en amenazas para el ser humano.

En el caso de las inundaciones los factores del ciclo hidrológico que influyen directamente en la generación de escorrentía superficial, y por tanto en las inundaciones, son:

#### *Factores de lluvia*

- Intensidad: volumen de precipitación por unidad de tiempo (mm/h).
- Duración: período de análisis. Lluvias de corta duración son las tormentas.
- Frecuencia: medida de la probabilidad de ocurrencia de eventos iguales o mayores al que se analiza. Usualmente se relaciona con el período de retorno.
- Patrón: variación temporal y variación espacial. Temporal representado por el hietograma de la lluvia.

#### *Factores de la Cuenca*

- Morfometría.
- Uso del suelo.
- Almacenamiento.

Los factores de lluvia no son afectados directamente por los procesos de urbanización, pero sí influyen mucho en la generación de inundaciones en cuencas pequeñas. Una lluvia más intensa (milímetros de lluvia por unidad de tiempo) concentra una mayor cantidad de agua en el suelo, y si la tasa de infiltración en el suelo o la velocidad de escurrimiento a los drenajes es menor que la intensidad de la lluvia

se comienza a generar más cantidad de agua en los drenajes, desbordándolos y produciendo inundaciones.

Los cambios climáticos a escala global están afectando los patrones de comportamiento de las lluvias en distribución temporal y espacial, incrementándose la frecuencia e intensidad de los extremos y produciéndose tormentas muy convectivas.

Al respecto puede decirse que en la época lluviosa de los últimos tres años no ha habido ningún temporal, y que más bien, las precipitaciones han sido muy convectivas e intensas durante toda la época lluviosa. Este tipo de precipitaciones son las que generan mayor problema de inundaciones en las cuencas pequeñas y urbanas.

En lo que atañe a los factores de la cuenca que pueden alterar el ciclo hidrológico y modificar los patrones de escorrentía generando mayor amenaza de inundación, básicamente es el uso del suelo el factor clave. Cuando se reduce o limita la capacidad del suelo a través de la cobertura vegetal para poder detener el impacto del agua y permitirle que ésta permanezca mayor tiempo en el suelo, las tasas de infiltración son mucho más lentas que las intensidades de las lluvias, generando mayor escurrimiento superficial y por lo tanto mayor cantidad de agua que pueda desbordar la capacidad de los drenajes.

### ***Tipos de inundaciones en El Salvador***

El tipo de inundación que se genera en un territorio específico depende del tamaño de la cuenca de recogimiento y su capacidad de respuesta y del tipo de evento hidrometeorológico que lo genera. En El Salvador se distinguen los siguientes tipos:

- Inundaciones en cuenca baja de ríos medianos y grandes: ocasionadas por temporales, eventos hidrometeorológicos como huracanes (principalmente en los meses de septiembre y de octubre).

- Inundaciones en cuencas de respuesta rápida: ocasionadas por precipitaciones muy convectivas, intensas y localizadas, de dos a tres horas de duración, con ocurrencia sobre todo en los meses de mayo y junio.

- Inundaciones en cuencas urbanas: también ocasionadas por precipitaciones muy convectivas; la problemática es generada por deficiencias y limitaciones en el sistema de drenaje urbano, obras sin control en cauces de ríos y quebradas, desechos sólidos en las quebradas y por supuesto, incremento de escorrentía por la impermeabilización de la cuenca alta.

## *Tipos de inundaciones urbanas*

Las inundaciones urbanas pueden ser ocasionadas por:

-Drenaje urbano: la urbanización aumenta los caudales naturales debido a impermeabilización y a la canalización del escurrimiento superficial. Aumenta la frecuencia y la magnitud de las inundaciones. Ejemplo: colapso del drenaje del arenal Montserrat que inundó las zonas aledañas.

-Inundación ribereña: inundaciones ocasionadas por la ocupación del cauce natural del río y de su planicie natural de inundación, esta zona es ocupada por la población durante períodos secos y durante las épocas lluviosas o los años húmedos se ven inundados.

-Intervenciones en el drenaje: construcciones de obras en el cauce del río, tales como muros, diques, obras de paso que no han sido adecuadamente diseñadas. Ejemplo: inundaciones de la colonia Costa Rica por la construcción de muros en el cauce del río ISNA.

-Flujos de lodo por desprendimiento en zonas más altas. Ejemplo: flujo de lodo que afectó viviendas en caserío Istmapa y colonia Los Ángeles.

## *Componentes de un sistema de drenaje urbano*

El drenaje urbano puede explicarse a partir de dos subsistemas: el macro y el micro drenaje, también denominados respectivamente sistemas mayor y menor.

El subsistema de macro drenaje incluye todos los cursos del escurrimiento definidos por las depresiones topográficas naturales de la cuenca, aún siendo efímeros. Por lo general drena áreas mayores a 5 kilómetros cuadrados, dependiendo del tamaño de la ciudad y relieve de la región. Una característica fundamental de este componente es que siempre existe, aún cuando no se ejecuten obras específicas de drenaje. Este subsistema debe ser capaz de eliminar o reducir los daños provocados por lluvias excepcionales, convenientemente hasta del orden de 50 o 100 años de tiempo de recurrencia. Aunque en El Salvador el período de retorno en el cual el macro-drenaje colapsa es más reducido, aproximadamente 5 a 10 años.

El subsistema de micro drenaje abarca todas las obras de drenaje realizadas en áreas donde el escurrimiento natural no es bien definido y, por lo tanto, termina siendo determinado por la ocupación del suelo. En un área urbana el micro drenaje responde al trazado de las calles e incluye el sistema de cordón-cuneta o alcantarilla, las bocas de tormentas y los sistemas de conducción subterránea hasta el macro drenaje. Este subsistema debe estar proyectado para operar sin inconvenientes ante tormentas con períodos de retorno entre dos y diez años, dependiendo del tipo

de ocupación del sector. En El Salvador este drenaje colapsa con precipitaciones anuales.

## **Problemática de inundaciones**

### ***Inundaciones ligadas al proceso de urbanización***

Desde el punto de vista hídrico la urbanización significa la impermeabilización progresiva del suelo de la cuenca hidrográfica, con los siguientes efectos directos sobre el drenaje pluvial de la región:

- Aumento de caudales en relación al estado natural.
- Aceleración de las ondas de crecidas (reducción de los tiempos de escurrimiento).
- Aumento del volumen escurrido.

En la medida que la urbanización se expande se intensifica este proceso, necesitándose la ampliación sistemática de la capacidad del sistema de drenaje. La literatura especializada cita algunos valores que permiten dimensionar la magnitud de este impacto. Para una cuenca de 260 hectáreas, Leopold ha estimado que su urbanización total junto a la ejecución de conductos de drenaje puede aumentar el caudal pico hasta seis veces en relación a la situación natural. Tucci ha analizado la variación del coeficiente de escurrimiento entre áreas rurales y urbanas, concluyendo que para sectores con urbanización media esta variación puede llegar a valores del orden del 200 por ciento.

La problemática de controles y normativas en las nuevas construcciones, se evidencia cuando una nueva lotificación es proyectada, usualmente los municipios solamente exigen que el proyecto de drenaje pluvial asegure el drenaje eficiente del sector, sin considerar el impacto del aumento del caudal máximo hacia aguas abajo. Una característica causante del descontrol observado en la mayoría de las ciudades es que quien impermeabiliza no sufre las consecuencias; los efectos hidrológicos sólo se verifican hacia aguas abajo.

En muchas ciudades se verifica un proceso de urbanización de las cuencas desde aguas abajo hacia aguas arriba. Como consecuencia, la combinación de impactos de los nuevos loteos producen aumento de la ocurrencia de crecidas e inundaciones hacia sectores de la población antes no afectados. Este proceso ocurre a través de la sobrecarga de la red de conductos subterráneos y/o cursos de mayor porte.

## *Habilitación de lotes inundables*

En San Salvador es muy común este tipo de inundaciones debido a la falta de restricciones y normativas respecto a los asentamientos informales en las áreas de crecidas extraordinarias y, algunas veces, ordinarias del río. Durante el período en el que el río no crece mucho estas comunidades están a salvo, pero cuando se tiene una crecida de mayor magnitud, los daños que sufren estas comunidades son casi totales.

Existen comunidades en las que sus calles son el cauce principal del río, y es imposible que éstas no se inunden.

## *Intervenciones humanas en los ríos*

Además de lo ya señalado, la falta de regulación, de control y de normativas permite que se realicen obras en las quebradas naturales sin un diseño adecuado, y sin considerar su natural comportamiento, o se realizan obras en sus cercanías sin considerar el impacto que pueden tener sus efectos aguas abajo. Algunos ejemplos serían:

- Encauzamiento de quebradas naturales por tratar de tener más área para construir en las nuevas lotificaciones, o en carreteras, o en calles, y no se considera el equilibrio hidráulico.

- Realización de obras en las quebradas: ya sea muros o gaviones para protección contra inundaciones de los terrenos aledaños sin un adecuado diseño, lo que desemboca en un estrechamiento de la quebrada causando inundaciones aguas abajo.

- Alteración de los patrones de escurrimiento por rellenos y embovedamientos: la búsqueda de terrenos y más áreas para construir urbanizaciones o edificaciones hace que se emboveden quebradas o que se rellenen sus cauces, sin considerar que estos son los drenajes naturales de la quebrada y que si no drenan por allí, deberán drenar por otra parte, causando problemas en otras áreas.

- Mal diseño de las obras de paso: también, por razones económicas o equívocas consideraciones técnicas, algunas veces las obras de paso son diseñadas con errores y limitaciones, y se construyen bóvedas y puentes de dimensiones menores a las requeridas.

- Desechos sólidos en los cauces: el taponamiento de las obras de paso por desechos sólidos, paradójicamente, es una de las mayores causas de inundaciones, que puede ser controlada por las municipalidades y las comunidades.

- Producción de sedimentos aguas arriba por urbanizaciones que no controlan sus desechos. Este es un grave problema durante los procesos constructivos de nue-

vas urbanizaciones que puede también ser controlado por regulaciones de las instituciones competentes.

### ***Problemática multicausal***

Como puede verse, la problemática de inundaciones en San Salvador, como en otras ciudades, está ligada a una serie de procesos, los que tienen su origen en el inadecuado ordenamiento territorial y en la falta de planificación urbana; hay algunos problemas que básicamente se deben a falta de normativa o a la carencia de un adecuado diseño de las obras de paso y de drenaje.

### **Principios de gestión integrada de drenaje urbano**

El principio de gestión integrada de recursos hídricos ha sido la base aceptada desde la Conferencia de Dublín para maximizar el uso de los recursos hídricos sin comprometer su sostenibilidad o causar pérdidas y daños en su uso.

El proceso de gestión integrada de inundaciones enlaza el desarrollo de los recursos hídricos y terrestres de una cuenca dentro del contexto de gestión integrada de recursos hídricos y pretende maximizar los beneficios netos de las planicies de inundación a la vez que se intenta minimizar las pérdidas y daños por efectos de las crecidas.

En el caso de las inundaciones urbanas la planificación deberá tener como eje el bienestar de la población y la protección ambiental, y por esto debe elaborarse un plan director de drenaje urbano.

Bertoni y Tucci han enumerado diversos principios sobre los que debe asentarse la formulación de este plan:

- Ningún usuario urbano debe ampliar la crecida natural: las crecidas naturales no pueden ser aumentadas por los que ocupan la cuenca, sea un simple loteo u otras obras derivadas del ambiente urbano. Esto se aplica al relleno de zonas bajas, a la impermeabilización de las superficies, a la construcción de calles y avenidas, ente otras acciones.

- Los impactos hidrológicos de la urbanización no deben ser transferidos: las obras y medidas a implementar no pueden reducir el impacto de un área en detrimento de otra u otras. En caso de que ocurra eso se deben prever medidas compensatorias ejecutivas.

- Las aguas pluviales requieren espacio: una vez que el agua de lluvia alcanza el suelo, escurrirá, exista o no un sistema de drenaje adecuado. Siempre que se elimine

el almacenamiento natural sin que se adopten medidas compensatorias, el volumen eliminado será ocupado en otro lugar. Canales y conductos desplazan la necesidad de espacio y deben ser proyectados teniendo presente este hecho. En otras palabras, el problema del drenaje urbano es, esencialmente, un problema de asignación de espacio, por lo que es indispensable preservar áreas o sectores para el manejo de las aguas.

-Las áreas bajas aledañas a los cursos de agua, delineadas por el escurrimiento, son parte de los cursos: toda ocupación que se realice en estas áreas originará posteriormente la adopción de medidas compensatorias onerosas. La preservación de estas áreas de inundación natural es invariablemente la solución más barata para los problemas de inundación. Adicionalmente, ofrece otras ventajas colaterales dentro del espacio urbano como la creación de áreas verdes y de recreación, preservación de los ecosistemas.

-La solución de los problemas debe involucrar la adopción de medidas estructurales y no estructurales: las medidas estructurales implican la alteración del medio físico a través de obras de conducción y regulación. Las medidas no estructurales presuponen una convivencia razonable de la población con los problemas.

-El subsistema de drenaje es parte de un ambiente urbano complejo: el subsistema de drenaje no debe ser un fin en sí mismo, sino un medio que posibilite la mejora del ambiente urbano de forma más amplia. Debe ser articulado con los otros subsistemas urbanos.

-La calidad y cantidad del agua constituyen variables del mismo problema: deben ser consideradas en conjunto.

-Todo estudio de drenaje urbano debe ser analizado en el contexto integral de las cuencas hidrográficas involucradas: es necesario eliminar las barreras existentes entre el estudio de los problemas del drenaje urbano (a cargo de las municipalidades) y el análisis del drenaje regional (a cargo de organismos provinciales o nacionales).

### ***Plan de gestión integrada de drenaje urbano***

El plan debe desarrollarse sobre la base del espacio urbano, las condiciones hidrológicas, la red hidráulica y las condiciones medioambientales para reducir los riesgos de crecidas. Los fines principales son:

-Regulación del uso de zonas de planicies de inundación mediante legislación y otras medidas no estructurales.

-Las medidas de prevención y mitigación de las consecuencias de crecidas de baja frecuencia.

-La mejora de la calidad de agua del drenaje urbano

El plan incluye:

-Medidas estructurales.

-Medidas no estructurales incorporadas en normativa de construcción urbana.

-Creación de capacidades: que ofrezca apoyo a largo plazo al plan.

### *Medidas estructurales*

Las medidas estructurales se relacionan con la ejecución de obras tanto en la cuenca hidrográfica como sobre los cursos de agua que sirven de colectores principales del sistema de drenaje urbano. Se incluyen dentro de estas medidas las obras siguientes:

-Drenaje a través de sistemas de conducciones subterráneas, canalizaciones, diques laterales de contención, disminución de la rugosidad, cortes de meandros, aumentos de pendiente. Obra que acelera el escurrimiento.

-Canales o conductos de desvío de escurrimientos (alivio) para aguas máximas.

-Reservorios de retención o de retardo a nivel domiciliario, en sistemas de conductos o a nivel del macro drenaje urbano (y que son atenuadores de crecidas).

Pero drenar lo más rápido posible la lluvia en exceso hacia aguas abajo a través de redes de tuberías y de zanjais produce un aumento del caudal aguas abajo, con una consecuencia directa de inundaciones y de contaminación. Y aquí la población pierde dos veces: el costo es mayor y aumentan las inundaciones y su frecuencia, los canales y los conductos tienen costos hasta diez veces mayores que el costo del control en la fuente.

Por otro lado, han sido comprobadas experimentalmente las ventajas comparativas de realizar el control en la fuente a través de obras que retrasen y que disminuyan el pico de la crecida, tales como pavimentos permeables, trincheras y planos de infiltración y obras de detención sin ligación con el drenaje pluvial.

El control del aumento del volumen escurrido en áreas urbanizadas también ha sido objeto de estudios mediante el aumento del porcentaje de superficies filtrantes y la ejecución de conductos subterráneos de drenaje que permiten una filtración controlada. Entre las superficies filtrantes se incluyen áreas de parques y pavimentos porosos. A excepción de las áreas con pastos, la efectividad de estas soluciones depende del grado de porosidad de las cavidades artificiales a través del tiempo. Se ha verificado que por lo general los sedimentos obstruyen sustancialmente los poros o huecos, reduciendo considerablemente el pasaje de agua.

Con relación a los conductos filtrantes cabe señalar que la posibilidad de genera-

ción de asentamientos en las fundaciones de las construcciones aledañas desestimula su aplicación.

### *Medidas no estructurales*

Las medidas no estructurales, por su parte, presuponen una convivencia razonable de la población con los problemas derivados de los procesos naturales, intentando así compatibilizar los costos de obras a ejecutarse con los recursos realmente disponibles. Algunos ejemplos:

- Regular el uso del suelo en las planicies de inundación: restringe uso de zonas propensas a sufrir inundaciones para nuevas urbanizaciones y planifica nuevas zonas de ocupación de la ciudad por medio de incentivos fiscales.

- Controlar el impacto de la urbanización sobre el drenaje (como sería una normativa que mantenga el caudal máximo del nuevo desarrollo urbanístico igual o por debajo del existente cuando no había urbanización, limitando así las superficies impermeables).

- Zonificación de áreas inundables: pautas de zonificación en función del período de retorno que inunda las zonas y el tipo y relevancia de la construcción (esto es: escuelas, unidades de salud, puestos de socorro y hospitales, definitivamente deben estar fuera del área de inundación).

- Sistemas de alerta temprana: que permitan avisar con suficiente tiempo para evacuar a las comunidades en peligro de inundación. Aunque en zonas urbanas la puesta en ejecución de estos sistemas es complicada, ya que las crecidas se dan en una forma casi instantánea.

- Definición de una política fiscal relacionada con el drenaje urbano: por ejemplo la alteración del monto individual de la tasa municipal destinada a obras de drenaje en función de la superficie impermeable y de los dispositivos de control de cada vecino. Dada la dificultad que este tipo de medida presupone para su ejecución, un criterio puede ser el actuar exclusivamente sobre aquellos contribuyentes que usufructúen amplios sectores impermeabilizados no cubiertos, como son las playas de estacionamiento y los patios de exhibiciones. El aumento debería ser realizado en forma diferenciada sobre el valor básico de la tasa respectiva. La disponibilidad de dispositivos de control debería ser contemplada en un sentido contrario: incremento del impuesto inmobiliario municipal sobre lotes declarados naturalmente inundables; aumento de los derechos de construcción e impuestos sobre las construcciones que se ejecuten en los centros de manzana de determinados sectores de la ciudad, previa zonificación de la ciudad o que realicen embovedamiento de quebradas.

## Consideraciones de diseño

Según todo lo anterior, es vital el considerar en el diseño de las obras de drenaje urbano las condiciones que pueden provocar inundaciones, así como las condiciones actuales de cambios en los patrones de precipitación y los futuros cambios en los patrones de escorrentía, por urbanizaciones en la cuenca alta.

### *Cálculo de crecientes*

Para el cálculo de crecientes en zonas urbanas se utiliza la formula racional:  $Q = CIA$ , que relaciona el caudal que escurrirá por un punto específico con la intensidad de lluvia determinada y el área de drenaje de la cuenca afectados por un parámetro de facilidad o limitación del escurrimiento que es el coeficiente de escorrentía  $C$ .

Para la determinación de la intensidad primero hay que seleccionar el período de retorno de la lluvia de diseño o la frecuencia futura estimada, la determinación de este valor dependerá de la decisión del riesgo que se puede asumir en la obra: a mayor frecuencia, menor período de retorno y menor valor de la precipitación. A menor frecuencia, mayor período de retorno la lluvia de diseño será mayor.

Durante los primeros minutos de la lluvia la intensidad es muy alta, pero como el tiempo es corto no se alcanza a drenar toda la cuenca, de ahí que el caudal que pasa por el punto en estudio no muy grande. A medida que transcurre el tiempo la cuenca comienza a aportar más agua porque es mayor el área que se drena, pero por otro lado la intensidad de la lluvia va disminuyendo poco a poco. El tiempo mínimo en el cual se drena toda la cuenca corresponde al caudal máximo, este valor coincide con el tiempo de concentración ( $T_c$ ) en cuencas pequeñas. Para determinar la intensidad de la lluvia se establece que el tiempo de duración de la lluvia que produce un máximo caudal sea igual al  $T_c$ .

En las curvas intensidad-duración-frecuencia del área en la cual se diseña se determina la intensidad de la lluvia de una duración igual al  $T_c$  para un período de retorno determinado.

Pero es de suma importancia considerar, especialmente en San Salvador, que deben utilizarse las curvas IDF más actualizadas, para poder incorporar en el análisis los cambios en los patrones de intensidad de lluvia que se están presentando. O deberá analizarse si las intensidades de lluvia con las que se está diseñando corresponden realmente a la actualidad.

Las nuevas construcciones aguas arriba de una comunidad provocan que aguas abajo se incremente considerablemente la escorrentía, como los drenajes de la

comunidad aguas abajo han sido diseñados considerando la cuenca alta como no intervenida, la impermeabilización de áreas cambia el factor de área no invertida a área impermeable, incrementando la escorrentía hacia aguas abajo. Por lo tanto, el otro parámetro crítico e importante a determinar es el valor de  $C$  o coeficiente de escorrentía, cuyo significado es la porción de agua que escurre con respecto a la que llueve. Con  $C = 1$ , el total de la precipitación escurre, con  $C = 0.7$  el 70 por ciento de la precipitación contribuye directamente al escurrimiento superficial y el otro 30 por ciento se infiltra. El valor de  $C$  depende de la pendiente del terreno, del tipo de suelo y de la cobertura vegetal. En una urbanización en la parte baja de la cuenca el valor de  $C$  de la cuenca cambia a medida que se urbaniza aguas arriba.

Podría ser una medida de control inicial que al proyectarse comunidades en una cuenca se considere que la cuenca aguas arriba será intervenida urbanísticamente y considerar el coeficiente de escorrentía mayor al que debería de tener sin urbanizar.

### *Diseño hidráulico y equilibrio del río*

Otro de los grandes problemas en las obras de drenaje y de paso en la ciudad es el diseño hidráulico errado. Debe considerarse antes que nada el equilibrio hidráulico del río, si se estrecha el paso del agua en una sección del canal del río el equilibrio se mantiene solamente con un incremento del nivel y de la velocidad del agua.

El diseño hidráulico, por tanto, debe considerar el equilibrio del río, la conservación de la energía y las pendientes del canal.

No es muy útil diseñar y construir un puente amplio para permitir el desalojo de un caudal de crecida si la pendiente aguas abajo no es la suficiente para darle velocidad al flujo, por lo que en muchas ocasiones lo que sucede es un proceso de sedimentación bajo el puente y un asolvamiento progresivo que culmina con la pérdida de capacidad hidráulica. Originalmente no es un problema de dimensión del puente sino de pendiente, pero al ser azolvado entonces sí se convierte en un problema de dimensión del puente.

Otro problema de diseño hidráulico inadecuado es cuando se hacen obras de paso de dos o tres tuberías y de cajas con pila central. La pila central detiene los sedimentos y dificulta el paso de los desechos sólidos, lo que finalmente también reduce la capacidad de drenaje de la obra.

## Referencias

- Bertoni, Juan Carlos y Carlos E. Tucci. *Inundaciones urbanas en América del Sur*, ABRH/GWP/WMO, Porto Alegre, 2003.
- Chow, Ven T. *Hidráulica de canales abiertos*, McGraw-Hill, México, D.F., 1994.
- Organización Meteorológica Mundial. “Un nuevo Paradigma en la Gestión de Crecidas”, *Boletín*, Volumen 53, No. 1, enero, 2004.
- Sistema Nacional de Estudios Territoriales. *Sistemas de alerta temprana en El Salvador*, San Salvador, 2003.
- Sistema Nacional de Estudios Territoriales, *Términos de referencia para estudios hidrológicos para diseño de drenaje urbano*, San Salvador, 2003.
- Sistema Nacional de Estudios Territoriales, *Términos de referencia para estudios hidrológicos para diseño de puentes*, San Salvador, 2003.
- Sistema Nacional de Estudios Territoriales, *Datos hidrometeorológicos y registro de crecidas e inundaciones*, 2004.