

CAPÍTULO 6

CONCEPTOS DE DISEÑO, PLANIFICACIÓN Y ASPECTOS METODOLÓGICOS

Curso: HIDROLOGÍA EN MEDIOS ANTROPIZADOS

**Maestría en Recursos Hídricos de Llanura
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario**

Dr. Ing. Civil GERARDO RICCARDI

ROSARIO, 2004.

ÍNDICE

- 6.1 GLOSARIO**
- 6.2 PRINCIPIOS GENERALES**
- 6.3 SISTEMAS DE DRENAJE. CANALES NATURALES Y EFECTO DE LA URBANIZACIÓN**
 - 6.3.1 Cursos de Agua Naturales**
 - 6.3.2 Efectos de Urbanización**
- 6.4 ELEMENTOS CONCEPTUALES BÁSICOS**
- 6.5 ACCIONES CORRECTIVAS Y PREVENTIVAS**
- 6.6 COMPONENTES ESTRUCTURALES DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE**
- 6.7 ANÁLISIS DE RIESGO**
- 6.8 PLAN MAESTRO DE DRENAJE**
- 6.9 INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL DISEÑO**
- 6.10 ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL DISEÑO HIDROLÓGICO**
 - 6.10.1 Líneas Metodológicas Básicas para el Dimensionamiento de Elementos del Sistema de Drenaje Pluvial**
 - 6.10.2 Clasificación de las Cuencas por su Tamaño (desde el punto de vista hidrológico)**
 - 6.10.3 Escalas de Abordaje y Niveles de Detalle en el Drenaje Pluvial**
- 6.11 BIBLIOGRAFÍA**

CONCEPTOS DE DISEÑO, PLANIFICACIÓN Y ASPECTOS METODOLÓGICOS

La etapa de diseño conceptual es donde son delineados los objetivos del proyecto en forma consistente con los principios rectores del control de desagües pluviales, objetivos de calidad del agua y políticas locales de drenaje. Los conceptos de diseño proveen una guía para las tareas de diseño tanto preliminares como definitivas. Durante la etapa conceptual, el proyectista formula los lineamientos generales y condiciones de borde del plan maestro del proyecto en estudio, debiendo preparar la documentación básica para someter a discusión con las partes involucradas (autoridades estatales, beneficiarios de las obras, etc) acerca de la naturaleza del problema, la hidrología, uso de la tierra, alternativas evaluadas, consideraciones de costos y financiamiento e impactos ambientales.

Todo sistema de drenaje pluvial comprende una variada gama de elementos físicos, e incluye vías de escurrimiento mantiforme, cunetas, canales, cursos de agua naturales, embalses de retención o detención, planicies de inundación y cuerpos de agua receptores. En esta Unidad se aborda el modo en el cual se interrelacionan a nivel del diseño conceptual los componentes naturales y artificiales (construidos por el hombre) en los sistemas de drenaje pluvial. Además se presentan pautas y aspectos metodológicos sugeridos para los estudios hidrológicos comprendidos en el diseño de sistema de drenaje pluvial.

6.1 GLOSARIO

Las siguientes definiciones son algunas de las utilizadas habitualmente en textos que abordan temáticas relacionadas con los sistemas de drenaje urbano (ASCE-WEF, 1992). Se hace hincapié en que las mismas pueden no ser definidas en la misma manera en otros textos.

Sistemas de Drenaje Pluvial o Sistema de Drenaje Urbano: están compuestos por los elementos físicos que colectan, almacenan, transportan y tratan el escurrimiento pluvial en zonas urbanas. Estos componentes incluyen: techos, canaletas de techos, conductos domiciliarios, calles, colectores pluviales, canales a cielo abierto, bocas de tormenta, captaciones de zanjas, cámaras de inspección, disipadores energía, etc.

Área Urbana: son zonas incluidas total o parcialmente en pueblos o ciudades. En general la diferenciación es entre área urbana o área rural. Algunos autores definen zonas de transición como áreas peri urbanas, semiurbanizadas, etc.

Planificación del Valle de inundación / Gestión del Valle de Inundación: son estudios técnicos y no técnicos, políticas, estrategias de gestión, estatutos y ordenanzas que gestionan colectivamente los valles o planicies de inundación en las riberas de los cursos de agua. En general los gobiernos nacionales y provinciales ejercen un rol mayor en la gestión y planificación de los valles de inundación, en tanto que los gobiernos locales tiene mayor injerencia en materia de diseño y gestión del drenaje pluvial urbano.

Sistema Menor, Primario, Inicial, Microdrenaje: es la porción del sistema de drenaje total que colecta, almacena y transporta escurrimiento de lluvias de frecuencia ordinaria (2-5 años) y provee un alivio a las molestias, daño e inconvenientes que las lluvias frecuentes ocasionan. Este sistema tradicionalmente ha sido cuidadosamente planificado, diseñado y construido, y en general representa la mayor porción de la inversión en infraestructura para drenaje urbano. El grado de inconvenientes que los habitantes están dispuestos a soportar debe balancearse con el precio que ellos están dispuestos a pagar por las obras, surgiendo de esta relación el caudal de diseño o la recurrencia de diseño del sistema menor. El sistema menor incluye cunetas, cordones cuneta, badenes, zanjas, bocas de tormenta, captaciones de zanjas, caños de conexión de bocas de tormenta y captaciones de zanjas, conductos y galerías subterráneos, cámaras, pequeños canales a cielo abierto, pequeños reservorios, alcantarillas y estaciones de bombeo entre las mas importantes. El límite del sistema menor es definido con un criterio hidráulico, y es aquel punto donde no se producen efectos adversos debido a remansos desde condiciones aguas abajo, para menores caudales con que el sistema menor ha sido diseñado. El sistema menor también suele ser denominado en ciertos textos como Sistema Primario o Sistema Inicial. Otros autores prefieren definir a este sistema como el Sistema de Microdrenaje.

Sistema Mayor, Secundario, Macro drenaje: es la porción del sistema de drenaje total que colecta, almacena y transporta el escurrimiento que excede la capacidad del sistema menor. El sistema mayor en

general es el camino natural de las aguas y es menos controlado que el sistema menor. El sistema Mayor funcionará haya o no haya sido deliberadamente diseñado y construido adecuadamente para transportar escurrimiento. El Sistema Mayor existirá siempre. Este sistema también operará cuando por alguna razón el sistema menor está obstruido parcial o totalmente o cuando el sistema menor no existe. Puede ser colineal o separado del sistema menor. Debe remarcar que existen autores que objetan la denominación “mayor” y “menor” para describir las porciones del sistema de drenaje argumentando que esos términos implican que el sistema menor es de menor importancia. En síntesis, pueden hallarse denominaciones de ambos sistemas como: Sistema Mayor y Sistema Menor; Sistema Primario y Sistema Secundario; Sistema Inicial y Sistema Secundario; Sistema de Microdrenaje y Sistema de Macrodrenaje.

Vías de Drenaje Mayores: son cursos de agua naturales o artificiales perfectamente identificables (canales, ríos, arroyos) que transportan escurrimiento, pudiendo recibir los aportes de los sistema menor y mayor de un sistema de drenaje urbano. Las vías de drenaje mayor pueden pertenecer al sistema mayor como puede ser un arroyo o río que atraviere una ciudad (ejemplo Arroyo Ludueña en Rosario) o pueden estar en los límites de las cuencas urbanas (Por ejemplo río Paraná en Rosario).

Drenaje Domiciliario: es el sistema que colecta, almacena y transporta el escurrimiento dentro de las propiedades. En general está compuesto por los techos, canaletas, almacenadotes (reservorios), cámaras y conductos domiciliarios. El límite del sistema domiciliario es la descarga del conducto domiciliario en la cuneta, zanja o cordón cuneta en la calle. Existen casos en que el drenaje domiciliario es colectado por conductos subterráneos sin llegar a la calle.

Conductos o Colectores Pluviales: son en general conductos cerrados enterrados que transportan escurrimiento pluvial. Cuando las cuencas son muy grandes los conductos pueden adquirir características de galerías subterráneas. Algunos autores utilizan denominaciones como alcantarillado para referirse a la red de conductos subterráneos.

Estructuras Especiales: son estructuras hidráulicas del sistema de drenaje urbano que suelen considerarse como accesorias tales como, cámaras o bocas de inspección, cámaras de conexión, bocas de tormenta, disipadores de energía, transiciones, vertederos, obras de caída.

Detención del Escurrimiento Pluvial: es el almacenamiento temporario del escurrimiento pluvial en techos, estanques, embalses, áreas bajas vegetadas, almacenadores subterráneos, que luego es liberado gradualmente. Se utiliza para amortiguar y retrasar el hidrograma de crecida.

Retención del escurrimiento pluvial: es el almacenamiento diseñado para eliminar volúmenes de escurrimiento superficial. Bajos húmedos y lagos pueden ser utilizados para la retención. Ciertas obras de embalses se diseñan para retener el escurrimiento pluvial proveniente del sistema menor y detener el escurrimiento del sistema mayor. Las obras de detención suelen denominarse embalses secos y a las de retención embalses húmedos.

Plan Maestro o Director de Drenaje: es el plan que el ingeniero proyectista formula para el manejo del escurrimiento pluvial urbano para un particular proyecto de drenaje. En general debe abordar al menos cuestiones como: *caracterización del lugar del proyecto de saneamiento, características de la nueva urbanización (o de la existente), vías de drenaje naturales o artificiales de la zona, caudales máximos y volúmenes de crecidas para varias recurrencias, crecidas ordinarias y crecida máxima (antes y después de la urbanización), criterios, dimensiones y localizaciones de obras de detención y colectores, incidencia sobre cuerpos de agua receptores, medidas para mejorar la calidad del escurrimiento, evaluación de impacto ambiental, marco de regulaciones generales y encuadre del proyecto dentro de tales regulaciones, y consistencia y compatibilidad con objetivos secundarios del proyecto como recreación, estéticos, protección de seguridad pública, recarga o descarga de escurrimiento subterráneo.*

Diseño Basado en Estándares: es el diseño de elementos del sistema de drenaje pluvial basado en un marco regulatorio vigente de estándares de diseño. Un ejemplo puede ser el diseño de una alcantarilla de modo tal que el escurrimiento no supere el coronamiento de la calle para una crecida de 10 años de recurrencia.

Diseño Basado en Consideraciones de Riesgo: es el diseño basado no solamente en estándares locales sino también en consideraciones de riesgo de que el flujo supere un determinado nivel de diseño. Es claro que todos los proyectos de drenaje pluvial involucran implícitamente consideraciones de riesgo al asumir una determinada recurrencia del evento (estándares recomendados) y una determinada vida útil de la obra, pero también es claro que los daños generados por la superación de niveles de diseño no son siempre los mismos para una igual recurrencia de diseño estandarizada. Cuando se habla

de daños se refiere a daños a la vida humana y a la propiedad pública y privada. Por ejemplo el proyectista de una alcantarilla puede adoptar una crecida de diseño entre 10 a 50 años basado en la protección a la propiedad, o puede considerar otras previsiones de seguridad para capacidad de descarga adicional para seguridad en una emergencia.

Obras de Drenaje Multipropósito: son las obras de drenaje que contemplan múltiples funciones tales como mejoramiento de la calidad del escurrimiento, control de erosión, hábitat silvestre, recreación pública, además de contemplar el objetivo primario que es el control del escurrimiento pluvial.

Criterios de Drenaje: son normativas y guías específicas establecidas por la autoridad hídrica regional y deben ser provistas o estar disponibles para los ingenieros proyectistas para llevar a cabo los proyectos de drenaje. Un ejemplo pueden ser las normativas de Diseño Hidrológico para el proyecto de un colector pluvial.

6.2 PRINCIPIOS GENERALES

Según ASCE-WEF (1992) y UDFCD (1984), entre otros, la experiencia ha mostrado que deben aplicarse los principios generales que se detallan a continuación, en la planificación y dimensionamiento de sistemas de drenaje pluvial urbano.

- (a) ***El Drenaje es un Fenómeno Físico Regional que no respeta las Fronteras entre Jurisdicciones Estatales y Gubernamentales o entre propiedades públicas y privadas:*** esto hace necesario formular programas que incluyan el involucramiento público y privado. Los planes directores o maestros y la coordinación general deben ser provistos por los organismos gubernamentales más directamente involucrados, pero la planificación regional del drenaje debe ser integrada y consensuada a nivel regional o de cuenca si se desean obtener mejores resultados. El modo en el cual el o los sistemas de drenaje propuestos se ajustan y adecuan a sistemas regionales existentes debe ser cuantificado y discutido en el ámbito del plan maestro.
- (b) ***El Drenaje Pluvial es un Subsistema del Sistema Total de los Recursos Hídricos Urbanos:*** la planificación y dimensionamiento de los sistemas de drenaje pluvial debe ser compatible con los planes regionales y debe ser coordinado particularmente con la planificación del uso y ocupación de la tierra, espacios abiertos y transporte. El control de erosión y sedimentos, control de crecidas y calidad de agua regional están fuertemente relacionados con la gestión del drenaje pluvial urbano. El plan maestro normalmente debe incluir todas esas consideraciones.
- (c) ***Toda Área Urbana tiene Dos Sistemas de Drenaje que deben ser Planificados y Dimensionados:*** un primer sistema es el sistema menor o primario, donde se desarrolla el microdrenaje, el cual es diseñado para evacuar flujos moderados relativamente frecuentes. El sistema menor comprende el escurrimiento en techos, canaletas y conductos en las propiedades, cunetas, badenes, bocas de tormenta, caños de conexión, cámaras y las redes primarias, secundarias, terciarias, etc., de conductos cerrados. El otro es el sistema mayor, el cual drena mayor cantidad de agua y opera cuando el escurrimiento excede la capacidad del sistema menor, en general se suele tipificar a este escurrimiento como macrodrenaje. El sistema mayor comprende las calles, canales, embalses, obras de control de erosión, cuerpo de agua receptores, etc. El sistema menor puede no existir, pero el sistema mayor existirá siempre. Ambos sistemas deben ser considerados cuidadosamente.
- (d) ***El Tránsito y/o almacenamiento de Flujo es un Problema de Localización Espacial:*** el volumen de agua presente en un determinado sitio urbano no puede ser comprimido o achicado. Los canales y redes de conductos cumplen funciones de conducir y almacenar transitoriamente el flujo. Si la previsión de demanda de espacio físico no es debidamente cuantificada, el escurrimiento pluvial entrará en conflicto con otros usos de la tierra implicando daños a la personas y materiales, o también interferirá con otros sistemas urbanos (por ej. inundaciones que afectan el transporte público).
- (e) ***La Planificación y Diseño de los Sistemas de Drenaje Pluvial no debe basarse en la Premisa de que el problema puede ser transferido desde un sitio a otro:*** la urbanización tiende a incrementar caudales máximos, volúmenes de crecida y a acelerar el flujo como así también deteriorar la calidad del agua. El escurrimiento pluvial puede ser almacenado transitoriamente en embalses urbanos de detención, los que pueden reducir la capacidad de drenaje requerida

aguas abajo. Pueden considerarse embalses a nivel domiciliario, de manzana, barrial o a nivel de subcuenca y cuenca.

- (f) **La Estrategia de Drenaje Urbano debe ser Multipropósito:** la intensa presión urbano sobre los espacios y recursos en una región urbana obliga a la estrategia de gestión del drenaje pluvial a incluir múltiples objetivos tales como mejoramiento de la calidad del agua, recarga / depresión de acuíferos, recreación, hábitat silvestre, creación de humedales, control de erosión y sedimentación, creación de espacios abiertos, etc.
- (g) **La Gestión de Sistemas de Drenaje Pluvial debe considerar las Características y Funciones de los Sistemas de Drenaje Naturales:** todo sitio contiene características naturales que pueden contribuir a la gestión del drenaje pluvial bajo las condiciones existentes. La existencia de características tales como vías de drenaje natural, depresiones, humedales, valles de inundación, suelos permeables y vegetación que provee infiltración natural, aporta al control de la velocidad de escurrimiento, aumenta el tiempo de concentración, contribuye al filtrado de sedimentos y otros agentes contaminantes y se reciclan nutrientes. Cada plan de urbanización debe identificar, mapear e inventariar la existencia de sistemas naturales. Técnicas ingenieriles “naturales” pueden preservar y mejorar las características naturales de un sitio y maximizar los beneficios económicos y ambientales post-urbanización. Los buenos proyectos mejoran la efectividad de sistemas naturales en lugar de desconocerlos, reemplazarlos, degradarlos o ignorarlos.
- (h) **En las Nuevas Urbanizaciones, los Caudales generados después de la Urbanización debe Aproximarse a las Condiciones Previas al Desarrollo y las Cargas de Contaminantes debe ser Reducidas:** deben considerarse tres conceptos:
- (1) La permeabilidad del lugar debe ser mantenida en la mayor extensión posible.
 - (2) Debe desacelerarse el escurrimiento. Deben priorizarse dentro de lo posible técnicas que mantienen la cobertura vegetal y la porosidad de la tierra. Estos sistemas promoverán la infiltración, el filtrado y la disminución de velocidad del escurrimiento. Si bien los sistemas que utilizan infiltración son preferibles, debe estudiarse la potencial modificación de la cantidad y calidad del escurrimiento subterráneo. Debe destacarse que puede resultar muy dificultoso restringir los volúmenes de escurrimiento post-urbanización, sin embargo existen regulaciones de drenaje pluvial que requieren que el caudal máximo saliente post-urbanización sea el mismo que en condiciones de pre-urbanización. Estas técnicas no traen mayores problemas si la cuenca drena a un gran cuerpo receptor con desnivel positivo, pero puede representar un problema para una pequeña cuenca cerrada que aporta un lago. A pesar de utilizarse embalses de retención, el nivel del lago puede aumentar debido al flujo adicional proveniente del escurrimiento freático poco profundo y de manera más importante a causa de que el incremento de la impermeabilidad reduce el área disponible para evapotranspiración. En tales cuencas, debe estudiarse el ciclo hidrológico no solo a nivel de tormentas severas sino a escala del balance anual.
 - (3) El control de la contaminación puede llevarse a cabo implementando una serie de medidas las que pueden incluir control de fuentes, minimización de áreas impermeables directamente conectadas y construcción in situ y a escala regional para controlar escurrimiento y contaminación.
- (i) **Los Sistemas de Drenaje Pluvial debe ser Diseñados, Comenzando desde el Punto de Salida de la Cuenca hacia Aguas Arriba:** la capacidad de transporte aguas abajo debe ser evaluada para asegurar que tiene suficiente capacidad para aceptar los caudales de proyecto sin generar remansos adversos o impactos aguas abajo tales como inundaciones, erosión de márgenes y sedimentación.
- (j) **Los Sistemas de Drenaje Pluvial deben Recibir Mantenimiento Periódicamente:** el mantenimiento insuficiente reduce la capacidad hidráulica y la eficiencia de la remoción de contaminantes, pudiendo en ocasiones ocasionar un deterioro estructural de las obras. La clave de un mantenimiento efectivo es la clara asignación de las responsabilidades a un organismo competente y a una programación regular de inspecciones para determinar las necesidades de mantenimiento y comprobar que el mantenimiento programado fue realmente hecho de acuerdo a lo establecido. La performance demostrada en el pasado en un determinado lugar en cuestiones de mantenimiento puede ser una de las bases para la selección de criterios específicos de diseño.
- (k) **Conocimientos Básicos y Gestión de Datos:** según UDFCD (1984) el primer paso en la implementación de un programa de drenaje es la obtención de la información de los hechos. En los casos en que no hay registros históricos, en vistas a asegurar en el futuro una adecuada planifi-

cación deben ponerse en marcha programas de recolección y análisis de datos de lluvia, escurrimiento e inundaciones. Asimismo si resulta crítico debe procederse a la medición sistemática de indicadores de contaminación del escurrimiento pluvial. Puede demostrarse que lo que no se mide en un determinado momento se convierte en incertidumbre de las variables involucradas que influirá por varias décadas en el adecuado conocimiento de un determinado proceso. Por otra parte, es prioritario al comienzo de cualquier proyecto de drenaje, la comprensión de los hechos históricos y la definición de los datos que deberán ser recolectados, procesados y analizados en la cuenca o en el área en estudio. Además, en lo referente a la planicie de inundación, es necesario tan pronto como sea posible la delimitación de áreas con riesgo de inundación a lo largo de los cursos de agua de las regiones que son urbanizadas. Esta delimitación deberá ser actualizada, reflejando los posibles cambios debido a nuevas urbanizaciones, condiciones de los canales y la ocurrencia de eventos hidrológicos extraordinarios

6.3 SISTEMAS DE DRENAJE. CANALES NATURALES Y EFECTO DE LA URBANIZACIÓN

6.3.1 Cursos de Agua Naturales

Gran parte del tiempo los sistemas naturales (colinas, valles, lagos, corrientes hídricas, valles de inundación, humedales, etc.) parecen estar en equilibrio. Si embargo este "equilibrio" es relativo, ya que ocurren continuamente modificaciones morfológicas debido a procesos de erosión y sedimentación.

La dimensión, forma y pendiente de una corriente hídrica son funciones de variables interrelacionadas como características del suelo, litología, ancho, altura de agua, velocidad, pendiente, carga de sedimentos, granulometría del sedimento, rugosidad hidráulica y caudales. La corriente hídrica se acomoda al caudal que recibe. Incrementando el flujo se altera la dimensión general, pero la forma de las márgenes de los canales tiende a permanecer constante. Las secciones transversales de muchas corrientes hídricas tienden generalmente a ser trapezoidales en tramos rectos, pero son asimétricas en curvas y meandros. Las secciones transversales tienden a volverse más rectangulares en la medida que el curso de agua se vuelve más grande en la dirección aguas abajo, ya que el ancho se incrementa más rápido que la profundidad hacia aguas abajo. La altura se incrementa más rápidamente que la velocidad hacia aguas abajo. El ancho generalmente se incrementa en una manera más consistente que cualquier otro factor, aproximadamente con la raíz cuadrada del caudal; y la velocidad media tiende a descender levemente en la dirección hacia aguas abajo en muchos cursos de agua. (Bureau of Reclamation, 1967)

En un curso de agua con abundante transporte de sedimentos, la resistencia de flujo es función de la dimensión del grano del fondo, por la forma o configuración adoptada por las partículas sobre el fondo del canal, y de la turbulencia del flujo que puede verse alterada por la variación en la carga de sedimentos. En la dirección hacia aguas abajo en la medida que aumenta el ancho y tirante del curso la pendiente hidráulica tiende a descender (también puede descender la velocidad de flujo) y las dimensiones de las partículas de fondo tienden a disminuir. Por lo tanto un aumento (constante o gradualmente variado) de gradiente de la corriente hídrica podría ser asociado a un aumento de la dimensión de las partículas de fondo. Un curso estable es aquel que ha alcanzado un pendiente hidráulica que produce la velocidad justa para el transporte de sedimentos aportado desde la cuenca tributaria. Cualquier cambio en las variables intervinientes causará el desplazamiento del equilibrio en una dirección tal que tenderán a absorber el efecto del cambio (Kolenkow et al., 1974 citado por ASCE-WEF 1992; Linsley et al., 1977).

6.3.2 Efectos de Urbanización

La urbanización altera el equilibrio natural de las corrientes hídricas. La erosión en los lugares de construcción de obras puede originar incrementos en las cargas de sedimentos locales del mismo orden de magnitud. Los aumentos de impermeabilidad y de eficiencia hidráulica de los sistemas de drenaje pueden generar aumentos de distinta magnitud de los caudales máximos de escurrimiento. El efecto sobre la corriente se incrementa cuando aumenta el porcentaje del área de la cuenca a urbanizar. Los aumentos de caudal máximo, volumen de escurrimiento y cargas de sedimentos pueden ser minimizados mediante componentes del sistema de drenaje como embalses de detención y medidas de control de erosión in-situ durante la etapa de construcción de obras. Si los incrementos de flujo y sedimentos no son minimizados, las corrientes hídricas naturales tenderán a agrandar sus dimensiones erosionando márgenes y fondo lo que generará cargas de sedimentos adicionales (ver Figura 1.17 de Capítulo 1) (Urban Land Institute, 1975,1978; U.S. Conservation Service, 1973 citados por ASCE-WEF, 1992).

6.4 ELEMENTOS CONCEPTUALES BÁSICOS

Los sistemas de drenaje pluvial deberían ser considerados y tratados como un subsistema de en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos Urbanos. Este elemento conceptual ideal, desafortunadamente, no es considerado así debido a una concepción de abordaje sumamente sectorizada que se ha llevado a la práctica por años en la gestión de los diferentes subsistemas: provisión de agua corriente, aguas servidas, control de inundaciones y drenaje pluvial urbano. La ventaja de la integralidad del abordaje desde la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos Urbanos, es que el drenaje urbano puede ser interrelacionado con la gestión del drenaje subterráneo, de la provisión de agua, de las aguas servidas, del control de cursos, del control de factores estéticos y emprendimientos recreacionales urbanos entre otros.

Cuando la capacidad del sistema menor es excedida, las calles principalmente y los canales superficiales (todos los componentes del sistema mayor o de macrodrenaje) comienzan a transportar el flujo excedente del sistema menor. Esta situación no constituye una falla del sistema de drenaje urbano. Este concepto tiene implicancias para diseño y para análisis de costos del sistema total, ya que la mayoría de los costos son por conductos de pequeños diámetros y accesorios adicionales (cámaras, conexiones, etc.). Para las crecidas más frecuentes, la mayor cantidad posible de escurrimiento debe almacenarse sobre la superficie con lo que resultará un sistema de drenaje menor más pequeño y menos costoso.

Para los eventos menos frecuentes, el proyectista debe determinar al menos en líneas generales, el posible camino del escurrimiento y las alturas y velocidades relacionadas en el sistema mayor. Esto no significa que deba hacerse en todos los casos un detallado análisis del sistema mayor, ni que los sistemas existentes (cuyo funcionamiento es conocido) necesiten siempre estar sujetos a este tipo de análisis. El concepto está orientado fundamentalmente a nuevas urbanizaciones, o a modificaciones importantes en sistemas de drenaje existentes. El objetivo es almacenar el agua fuera de las viviendas, y asegurar que las alturas y velocidades sean predeterminadas y no se transformen en variables aleatorias para la seguridad y la conveniencia de la población.

Los diseños pueden combinar porciones del sistema menor y mayor en un único sistema. Varias vías de drenaje, naturales y artificiales, pueden transportar el drenaje proveniente tanto de pequeñas como grandes tormentas sin causar daños. Se requiere imaginación, iniciativa e ingenio de parte de los proyectistas, urbanizadores y autoridades gubernamentales hídricas locales para incorporar las vías de drenaje en la ciudad de modo tal que sea compatible con todo el ambiente urbano. Los logros pueden resultar en un sistema general que cuesta menos, es estéticamente aceptable y evita daños aún en eventos catastróficos (UDFCD, 1984).

6.5 ACCIONES CORRECTIVAS Y PREVENTIVAS

En áreas urbanizadas existentes, el proyectista frecuentemente encontrará necesario desarrollar estrategias basadas en medidas preventivas y correctivas. Las acciones correctivas estructurales afectan y controlan el flujo directamente y pueden comprender obras como bocas de tormenta, conductos, Interceptores de flujo, canalizaciones y recanalizaciones de cursos de agua y reservorios. Asimismo, existen medidas correctivas no estructurales que limitan actividades y usos del suelo en las cercanías de las vías de escurrimiento y en las planicies de inundación de cursos de agua.

Acciones Preventivas

Las acciones preventivas para reducir el escurrimiento y las pérdidas por inundaciones pueden incluir:

- (a) Delimitación de zonas con riesgo de inundación.
- (b) Regulaciones del uso y ocupación en los valles de inundación.
- (c) Adquisición de tierras en las adyacencias de cursos de agua.
- (d) Regulación de las subdivisiones de la tierra.
- (e) Confección de Código de Edificación.
- (f) Difusión de información y actividades de educación respecto a zonas con riesgo de inundación.
- (g) Pronóstico de lluvias y crecidas, sistemas de alerta y medidas de emergencia.
- (h) Medidas para reducir la tasa de escurrimiento.
- (i) Medidas para reducir la erosión.
- (j) Medidas de protección contra inundaciones (como acción preventiva y correctiva)

El proyectista de sistemas de drenaje urbano debe reconocer que las zonas con riesgo de inundación no son solo aquellas en las cercanías de los cursos de agua, sino también en zonas comerciales y residenciales ubicadas en zonas altas y alejadas de cursos de agua, pero con sistemas de drenaje deficiente o

inadecuados (subdimensionados) y donde los niveles de pisos de las edificaciones son sumamente bajos y los cordones y cunetas están frecuentemente sujetos a desbordes de escurrimiento.

Mediante el control del crecimiento del desarrollo en los valles de inundación, las pérdidas pueden ser reducidas y el beneficio neto proveniente del uso permitido de las planicies de inundación puede aumentar. Deben considerarse siempre beneficios para la comunidad tales como reducción de la exposición al riesgo, disminución de costos públicos por ayuda y rehabilitación y descenso de la dependencia de obras de protección. La adquisición de propiedades expuestas a riesgos elevados de inundación puede emplearse como medida a largo plazo para reducir las pérdidas por inundaciones al mínimo costo público.

Delimitación de Áreas Inundables

La delimitación de las vías de escurrimiento con drenaje más intenso y las áreas inundables asociadas a diferentes recurrencias es el primer paso para la regulación de las áreas con riesgo de inundación. El escenario de análisis debe contemplar siempre tanto la situación existente como las urbanizaciones proyectadas a futuro en concordancia con la planificación maestra de desarrollo urbano a largo plazo. Con el conocimiento de las áreas con riesgo de inundación actual y futura, la adquisición de tierras en las zonas con riesgo puede ser una medida para evitar daños inaceptables humanos y a la propiedad. Además pueden lograrse otros beneficios mediante la preservación de la capacidad de almacenamiento de flujo y la implantación de espacios abiertos recreacionales.

Acciones Correctivas

Las soluciones de problemas con el drenaje existente, inundaciones azarosas y calidad de agua pueden requerir acciones correctivas (obras estructurales) aún en el marco de un plan de gestión básicamente no estructural. Estas acciones correctivas pueden ser entre otras:

- (a) Construcción de conductos, embalses y prácticas de mejoramiento de la calidad del agua.
- (b) Modificaciones en los usos de la tierra.
- (c) Canalizaciones o recanalizaciones de cursos de agua.
- (d) Aumento de luz de puentes y aberturas de alcantarillas.
- (e) Modificación de obras anexas a puentes y alcantarillas como embocaduras y transiciones en la descarga
- (f) Protección contra inundaciones de edificaciones.

Las modificaciones en el uso de la tierra pueden incluir rezonificación, relocalización de estructuras, remoción programada de estructuras incompatibles con el drenaje, y compra de propiedades ubicadas en zonas inundables (que pueden ser alquiladas para usos temporarios). En lugar de construcciones de nuevos sistemas, puede ser a veces ventajoso reacondicionar sistemas existentes, aumentando su capacidad de conducción o proveyéndolos de capacidad de control de polución. Un claro ejemplo de estas nuevas tendencias es la construcción de embalses domiciliarios y en bocas de tormentas en redes existentes, a los efectos de atenuar los caudales máximos de los hidrogramas de aporte (ver por ej. Secchi et al., 2001). Las nuevas tecnologías para contribuir al reacondicionamiento de redes existentes están en continuos nuevos desarrollo. Sin embargo, debe notarse que, comparadas con la construcción de sistemas de drenaje en áreas nuevas el reacondicionamiento de sistemas existentes puede resultar costosos debido a factores como costo de la tierra (el costo de la tierra en áreas con alta densidad de población y con todos los servicios es generalmente superior al costo en áreas a urbanizar), y costo de las interferencias con otros sistemas como por ejemplo el tráfico y otros servicios.

6.6 COMPONENTES ESTRUCTURALES DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE

En puntos anteriores se ha enfatizado la necesidad de analizar los requerimientos del drenaje en el contexto del sistema urbano integral, para relacionar los efectos de soluciones de drenaje local a sus impactos acumulativos sobre el sistema de drenaje global, y poder considerar en el diseño una amplia gama de medidas no estructurales y de uso de la tierra. Igual importancia debe ser puesta sobre los componentes estructurales del sistema de drenaje. La lista siguiente de ciertos componentes estructurales y consideraciones de diseño no debe ser considerada como completa ni tampoco significa un ordenamiento alguno en el diseño (ASCE-WEF, 1992):

(i) Vías del Drenaje Mayor

- (a) ¿Donde están ahora y donde deberían estar al cabo de la urbanización?
- (b) ¿Cuan lejos en la cuenca deberían extenderse?
- (c) ¿Como se comportarán en distintas crecidas?
- (d) ¿Cuales son las características geomorfológicas relevantes?

- (e) ¿Que tipos de cursos de agua existen aguas arriba y aguas abajo?
- (f) ¿Como funcionan actualmente los valles de inundación y cuanto pueden y/o deben ser estrechados?
- (g) ¿Cuanta porción de tierra debe ser asignada para transporte para escurrimiento de crecidas? ¿es adecuado? ¿es compatible con los objetivos de la comunidad?
- (h) ¿Se requieren mejoramientos de componentes existentes?
- (i) ¿Pueden/deben ser cubiertos objetivos multipropósitos en los cursos de agua?
- (j) Canales revestidos
 - (a) ¿Existen limitaciones de paso en la traza del canal que acotan el ancho del canal?
 - (b) ¿El flujo será subcrítico o supercrítico?
- (k) Canales sin revestir (vegetados)
 - (a) ¿Las velocidades de escurrimiento serán compatibles con el suelo existente?
 - (b) ¿Existen limitaciones de paso en la traza del canal teniendo en cuenta los taludes laterales?
- (l) Grandes Conductos
 - (a) ¿Es un gran conducto preferible a un canal a cielo abierto?
 - (b) ¿Sería igualmente necesario un canal a cielo abierto para emergencias?

(ii) Calles

- (a) ¿Que alturas y velocidades de flujo serán permitidas en las cunetas para la crecida de diseño del sistema menor? ¿Que alturas y velocidades para el sistema mayor? ¿Pueden la velocidades ser mantenidas de los límites de seguridad?
- (b) ¿ Puede ser mantenida una pendiente longitudinal de 0.5% ?. En caso contrario ¿cual es la pendiente máxima que puede mantenerse?
- (c) ¿Como será manejado el flujo a través de los coronamiento de calles y en las intersecciones?
- (d) ¿Que alturas de flujo sobre las calles serán las apropiadas para el escurrimiento en el sistema mayor, considerando condiciones locales y clases de calles (locales, colectoras, o avenidas)?
- (e) ¿Cuanto reducirán la capacidad de transporte de flujo del cordón-cuneta las futuras repavimentaciones?

(iii) Conductos de Desagües Pluviales

- (a) ¿Serán necesarios conductos de desagües pluviales?
- (b) ¿Serán diseñados para flujo a presión o para flujo a superficie libre?
- (c) ¿Serán construidos en túnel o a cielo abierto?
- (d) ¿Deben considerarse sistemas o dispositivos para control de ingreso de basura, piedras, desechos, etc.?
- (e) En caso de riesgo de obstrucción la desobstrucción y limpieza debe ser consideradas en el proyecto, contemplando un adecuado acceso para el equipamiento durante crecidas importantes.

(iv) Bocas de Tormenta

- (a) ¿Donde será óptimo el uso de bocas de tormentas verticales? ¿Donde deben usarse bocas de tormenta horizontales, combinadas y/o con depresión?
- (b) ¿Cuanta capacidad de captación de bocas de tormenta es requerida para aprovechar la capacidad total del sistema de conductos pluviales?
- (c) ¿Debe ser limitada la capacidad de captación de bocas de tormenta en algún lugar en detrimento de otras áreas, para evitar sobrecargas de la red de conductos durante el escurrimiento por el sistema mayor?
- (d) El proyecto de los conductos para la tormenta de diseño del sistema menor debe ser compatible con el flujo superficial generado en eventos con escurrimiento por el sistema mayor.

(v) Intersecciones

- (a) ¿Deben las calles estar totalmente libres de aguas superficiales para la tormenta de diseño del sistema menor? ¿Deben usarse badenes? ¿Cual es el efecto sobre el tráfico?
- (b) ¿Como deben ser manejadas las intersecciones en T cuando se localizan en el extremo aguas abajo de una calle con elevada pendiente longitudinal?

(vi) Dispositivos de Control de Flujo

- (a) Los disipadores de energía son necesarios en los casos en que la velocidad de flujo es superior al las que resiste la vía de desagüe por donde va a comenzar a transitar el escurrimiento. La alternativa de disipar energía es siempre función de las características resistivas contra la erosión del componente del sistema que recibe el escurrimiento. Pueden ser adecuados en la unión de un canal revestido con un canal de tierra, en la desembocadura de un conducto en un canal de

tierra, en la salida de una alcantarilla, o en cualquier otra situación en que la energía de flujo deba ser reducida.

- (b) Las obras de caída hidráulica son necesarias para mantener las velocidades de flujo dentro de los límites de diseño cuando los canales tienen pendientes longitudinales excesivas.
- (c) Las obras de transición de flujo se utilizan en puntos de cambio de pendientes de canales, cambios de formas de secciones transversales, cambios de tipo de flujo (subcrítico a supercrítico), cambios de material constitutivo de canales, entre otros.
- (d) Las curvas en canales a cielo abierto necesitan ser analizadas hidráulicamente en relación a las pérdidas de energía, posibilidad de sobrepaso o erosión de margen externa y eficiencia.

(vii) Rejas y Dispositivos Interceptores de basura, escombros, etc.

- (a) ¿Es necesaria la utilización de rejas?
- (b) ¿El taponamiento u obstrucción de las rejas causará una falla en el sistema? ¿en qué grado?
- (c) ¿Que problemas constructivos se presentan comúnmente y como influirá en los costos?

(viii) Embalses de Detención / Retención

- (a) ¿Deben ser usados embalses de detención/ retención para reducir las dimensiones de los conductos?
- (b) ¿Es requerida la detención? En caso afirmativo, ¿cuales son las regulaciones apropiadas? ¿quién reglamenta la capacidad?
- (c) ¿Cuales son las frecuencias de los caudales de diseño?
- (d) ¿Que tipos de detención / retención son apropiadas? ¿Son necesarias detenciones o retenciones a pequeña escala (domiciliaria, boca de tormenta) o a nivel de cuenca o subcuenca?
- (e) ¿Como se considerarán cuestiones relacionadas con los embalses tales como control de procesos de erosión/sedimentación, mejoramiento de la calidad del escurrimiento, creación de áreas parqueadas seguras y atractivas, recarga de acuíferos y otras consideraciones multiuso?
- (f) ¿Como los dispositivos de retención / detención influirán sobre el sistema de drenaje regional?

(ix) Medidas de Mejoramiento de Calidad de Agua

- (a) ¿Cuales son los requerimientos locales ? ¿ Qué contaminante debe ser removido parcial o totalmente? ¿Cuanto de cada contaminante debe ser removido y con que frecuencia?
- (b) ¿Qué medidas de mitigación pueden ser adoptadas y en que forma pueden ser optimizadas?

(x) Estructuras Hidráulicas Especiales

- (a) ¿Que tipo y cuantas estructuras especiales (obras de embocadura y desembocadura de conductos, transiciones, sifones, vertederos, etc.) serán necesarias?
- (b) ¿Que consideraciones de diseño deben ser tenidas en cuenta?

Una característica de los problemas de diseño de sistemas de drenaje pluvial (y de la ingería hidráulica en general) es que las consideraciones de diseño mencionadas anteriormente (que no son las únicas) no pueden ser reducidas a reglas simples. La imaginación, la interpretación del fenómeno físico, la experiencia y el juicio criterioso, juegan roles de igual importancia en la etapa de diseño conceptual de proyectos de drenaje urbano satisfactorios (ASCE-WEF, 1992).

6.7 ANÁLISIS DE RIESGO

Un paso esencial en el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano es la selección de la recurrencia de diseño tanto del sistema menor como del sistema mayor. Esta selección gravitará en el nivel de protección contra inundaciones y el costo de la obra. Un claro conocimiento de los riesgos y costos asociados a cada alternativa del diseño del sistema de drenaje conduce a mejores sistemas de drenaje y una criteriosa utilización de las inversiones públicas y privadas.

No existen reglas fijas y simples respecto a la recurrencia del diseño. El ingeniero proyectista debe conocer cual son las políticas locales respecto a recurrencias de diseño y entonces preguntarse si son apropiadas para el proyecto en cuestión. El buen juicio y sentido común de los proyectistas y de las autoridades hídricas locales debe sustituir cualquier tipo de estándares uniformes pero arbitrarios. Los entes reguladores locales pueden aceptar, o al menos someter a consideración, alternativas propuestas fuera de los estándares pero basadas sobre principios de la evaluación de riesgo (ASCE-WEF, 1992).

(i) Definiciones

Riesgo es la expresión de potenciales consecuencias adversas medidas en términos de inconveniencia, daños, seguridad o responsabilidad profesional o política. El análisis de riesgo es la cuantificación de la exposición, la vulnerabilidad y la probabilidad de ocurrencia. El análisis de riesgo involucra la evaluación de medios alternativos para reducir el riesgo y finalmente la aceptación de niveles de riesgo aceptables (Wiggins, 1978 citado por ASCE-WEF, 1992).

En el contexto del análisis de riesgo el evento de diseño es el evento cuyo escurrimiento el sistema de drenaje pluvial debe poder colectar y transportar (almacenar si correspondiese) sin generar consecuencias no deseadas (riesgo inaceptable). Esto significa definir la incertidumbre (el período medio de retorno, la probabilidad de no excedencia), determinar el riesgo aceptable (ningún evento con recurrencia menor a la de diseño excederá la capacidad del sistema menor o de microescurrimiento) y cuantificar la vulnerabilidad del sistema consistente con el riesgo aceptable.

Debido a que en ocasiones algunos criterios relacionados con la recurrencia de diseño son aceptados como principios, pueden surgir confusiones respecto acerca de los correspondientes significados. Por ejemplo, una crecida de $R = 100$ años de recurrencia significa que el evento tiene una probabilidad de ocurrencia de $1/R = 0.01$ en cualquier año. Ha veces se considera que el evento ocurrirá una vez cada 100 años, lo cual es verdadero en términos de promedio de muchos períodos de 100 años, pero puede no ser verdadero para un período en particular de 100 años. Además, dentro del contexto del análisis de riesgo, la consecuencia no deseada no es el escurrimiento generado sino el daño resultante. Es la incertidumbre de esta consecuencia lo que importa y no la ocurrencia del evento.

La definición del tipo de análisis de riesgo a emplear en el diseño y selección del sistema de drenaje depende de la naturaleza y magnitud de las consecuencias no deseadas. Para situaciones simples, el mero reconocimiento del riesgo, la incertidumbre y las posibles consecuencias adversas pueden ser suficiente para poder emitir un juicio de valor (por ej. el análisis de riesgo de una alcantarilla de acceso vehicular, donde la consecuencia no deseada es el impedimento a transitar sobre la obra durante algunas horas). Cuando se trata de la salud y seguridad pública debe llevarse a cabo un análisis riguroso. No obstante, en cualquier evento los elementos del análisis de riesgo deben ser sistemáticamente considerados en la formulación de los parámetros de diseño y los procesos de toma de decisiones.

(ii) Metodología

La determinación de los factores causantes de riesgo y consecuencias no deseadas requiere una evaluación de la probabilidad de ocurrencia y la valorización del potencial daño. Según ASCE-WEF (1992) deben llevarse a cabo cuatro determinaciones:

1. *Determinación de evento de diseño*: primeramente debe ser definido el evento crítico (por ej. el evento de diseño) y estimadas todas sus magnitudes. Para diseño de drenaje los eventos serán aquellos que produzcan consecuencias no deseadas. Solamente los eventos que causen daños deben ser evaluados. De ellos se deberá determinar la probabilidad de ocurrencia.
2. *Determinación de la vulnerabilidad ante la exposición* (personas y propiedades que pueden llegar a ser dañadas).
3. *Determinación de las consecuencias ante la exposición*. Este elemento puede abarcar desde inconveniencia en la seguridad pública hasta severos daños humanos y a la propiedad.
4. *Determinación de la valorización de las consecuencias*. Cada una de las consecuencias determinadas debe ser valorizada económicamente.

Para un determinado diseño pueden determinarse la probabilidad de inundación, el daño esperado y el costo del sistema. Los resultados en términos de probabilidad, daño y costo constituyen un punto de la curva de análisis de riesgo. Deben considerarse varias alternativas asociadas a diferentes probabilidades de ocurrencia lo que resultará en varios puntos de la curva. El diseño seleccionado debe ser aquel que equilibre prevención y aceptación a un punto de riesgo y costo aceptable. En el Capítulo 3 pto. 3.3.5 se presentan algunos métodos para estimar la recurrencia de diseño, el riesgo de falla y el análisis hidro-económico.

6.8 PLAN MAESTRO DE DRENAJE

Según ASCE-WEF (1992) un plan maestro de drenaje típicamente comprende elementos tales como caracterización de la zona a urbanizar, plan de mejoramiento, caudales máximos y volúmenes de diferentes crecidas asociadas a recurrencias, ubicaciones, criterios y dimensionamiento de obras de embalse y conducción de flujo, medidas de mejoramiento de calidad de agua pluvial, regulaciones y

objetivos secundarios como recreación pública, estética, protección de seguridad pública y recarga de acuíferos.

En su forma más simple, un plan maestro puede identificar los elementos esenciales, ordenamiento y funciones de un sistema de drenaje. Aun en el nivel conceptual, un plan maestro debe estar basado en la estimación de hidrogramas y caudales máximos para un determinado rango de recurrencias de diseño. Estos rangos de recurrencia (o probabilidad de ocurrencia) deben estar basados en conceptos de análisis de riesgo.

El nivel siguiente de planificación maestra debe establecer criterios específicos consistentes con riesgos aceptables, incluyendo caudales de diseño, perfiles de superficie libre y tirantes. En el establecimiento de perfiles de superficie libre deben ser contempladas las pérdidas de carga localizadas más relevantes en las vías principales de escurrimiento. Este nivel de planificación maestra puede proveer la información necesaria para definir los últimos componentes del sistema de drenaje y ejecutar un diseño preliminar con estimación aproximada de costos. Además, provee información básica útil para evaluar la factibilidad y sentido práctico de los componentes del sistema considerados y permite los diseños de componentes locales con una seguridad razonable que serán compatibles con el sistema integral.

En los casos en que algunos componentes del sistema de drenaje deben estar completos y en operación antes que otros componentes, el plan maestro de drenaje debe identificar las prioridades de terminación de componentes fundamentales.

Una comunidad no debe permitir bajo ningún aspecto una urbanización no planificada de una cuenca de drenaje, particularmente cuando tal desarrollo ocurre en un largo período de tiempo y no uniforme en toda la cuenca, sin establecer primero todos los controles a los parámetros de diseño por medio de un plan maestro. Fallas en la planificación potencian en el futuro la presentación de inundaciones significantes, posibles daños a vidas humanas y a propiedades y problemas en las construcciones de obras de drenaje.

6.9 INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL DISEÑO

Dependiendo del tipo de obras de drenaje pluvial imaginado y la etapa del proceso de diseño, la siguiente información podrá ser requerida para el diseño específico de una obra en una determinada área. En muchos casos la información puede ser obtenida en organismos de gobierno nacionales, provinciales y municipales (Direcciones de Topografía, de Hidráulica, de Pavimentos, de Vialidad, de Transporte, de Catastro, de Obras Públicas), concesionarias de servicios (agua potable, cloacas, empresas de energía, empresas telefónicas, empresas de distribución de gas, líneas de trenes y subterráneos, etc.) o recurrir a trabajos de observación y medición en campaña.

(i) Información Topográfica

- (a) Mapas de la ciudad, del distrito, de la cuenca, planchetas de Instituto Geográfico Militar (IGM) u otros mapas topográficos.
- (b) Fotografías aéreas e Imágenes Satelitales.
- (c) Mapas de Suelo.
- (d) Mapas de Cobertura Vegetal.
- (e) Planos catastrales.
- (f) Tareas de Campaña:
 - (1) Límites de la Cuenca de Drenaje para confirmar interpretación de mapas.
 - (2) Características del Uso de la Tierra Existente y Proyectado (algunas ciudades tiene planes maestros con la planificación del uso de la tierra proyectado)
 - (3) Vías de escurrimiento típicas, bajos, cañadones, canales, vías de escurrimiento mayor (arroyos, grandes canales y ríos).
 - (4) Pendiente y longitudes de tramos de vías de escurrimiento.
 - (5) Secciones transversales típicas de cursos de agua.
 - (6) Lugares potencialmente utilizables como embalses de detención.
 - (7) Todo tipo de obras de drenaje y control de crecidas relevantes existentes como alcantarillas, terraplenes, puentes, dispositivos de caída hidráulica, etc.
 - (8) Propiedades que han soportado inundaciones en el pasado.

El propósito de las investigaciones de campo es confirmar todos los datos obtenidos a partir de mapas, fotos, imágenes y planos, y detectar todo tipo de información que no conste en estos. Si el proyectista no cuenta con información de mapas, fotos imágenes y planos tendrá que prever su realización.

(ii) Información Catastral y de Instalaciones y Existentes

- (a) Planos de subdivisión en manzanas, lotes y esquinas.
- (b) Clasificación de superficies urbanas existentes.
- (c) Planos de Puntos Fijos (IGM o de otras mediciones oficiales).
- (d) Fotografías aéreas.
- (e) Calles, vías de ferrocarril, escuelas, parques, hospitales y otras características físicas de superficie existentes.
- (f) Todo tipo de uso del espacio público subterráneo por parte de instalaciones de servicios subterráneos que pueden presentar interferencias con la red de drenaje: provisión de agua, teléfono, electricidad, semaforización, cable, fibra óptica, cloacas, red de trenes subterráneos, construcciones subterráneas, etc.
- (g) Existencia de servidumbres y permisos de paso y sus características.
- (h) Cualquier otro impedimento a la instalación de sistema de drenaje como espacios públicos abiertos, hábitat protegido, etc.

(iii) Datos Geológicos y de Suelos

- (a) Características de infiltración y permeabilidad de los suelos de la cuenca.
- (b) Otras características estándares de los suelos como granulometría, densidad, y clasificación.
- (c) Toma de muestras y ensayos de laboratorio en lecho y márgenes de cursos de agua.
- (d) Propiedades resistentes del suelo para evaluación de estabilidad de excavaciones y fundación de estructuras.
- (e) Datos requeridos para evaluar la conveniencia de los lugares de posible emplazamiento de una presa (si se piensa en la detención de flujo).
- (f) Niveles estacionales de napa freática.
- (g) Localizaciones y características de roca firme, especialmente para análisis de fundaciones.
- (h) Otras características geotécnicas requeridas por el diseño hidráulico y estructural.
- (i) Mapas geológicos locales o Reportes e Informes relacionados con características que puedan influir sobre el proyecto.
- (j) Cualquier otro suceso aleatorio natural que pueda afectar el sistema de drenaje tal como deslizamiento de tierras, fallas, terremotos, etc.

(iv) Datos Hidrológicos e Hidráulicos

- (a) Datos históricos de alturas de agua y/o caudales en cursos de agua.
- (b) Datos de lluvia local. Información sobre curvas intensidad/duración/recurrencia, hietogramas y distribuciones espaciales y temporales de lluvias.
- (c) Características de cursos de agua y conductos de drenaje incluyendo pendiente longitudinal, secciones transversales, coeficiente de rugosidad, erosionabilidad, estado de mantenimiento.
- (d) Condiciones de borde de cuenca en estudio: cuerpo de agua receptor (ríos, lagunas, lagos, canales, mar); vinculación hidrodinámica con cuerpo receptor; régimen global de alturas y caudales de cuerpo receptor.
- (e) Datos históricos sobre posibles trasvases entre subcuencas (problemática típica de llanura).
- (f) Elevación de la línea de flujo requerida por el análisis hidráulico de la línea piezométrica. Características de subcuencas: áreas, pendientes, cantidad y longitud de cursos, etc. , para determinación de tiempo de concentración.
- (g) Estructuras hidráulicas existentes incluyendo conductos pluviales, boca de tormenta, alcantarillas, canales, terraplenes, puentes, presas, vertederos, embalses y otras obras.
- (h) Áreas de almacenamiento existentes, tanto las utilizadas como las no advertidas, vinculadas al tránsito de crecidas.
- (i) Datos de escurrimiento subterráneo: niveles freáticos, permeabilidad acuíferos más cercanos a superficie, sitios con posibilidad de afloramientos en superficie.
- (j) Datos de calidad de agua de: escurrimiento pluvial y de cuerpo de agua receptor.
- (k) Información sobre grandes crecidas históricas en las cercanías de la zona en estudio a partir de búsqueda bibliográfica, entrevistas con profesionales y habitantes del lugar, notas en periódicos, marcas de inundación (en columnas de puentes, postes, paredes) y otras fuentes de información.

(v) Datos de los Marcos Regulatorios

- (a) Ordenanzas de Urbanización y Mapas de Zonificaciones.
- (b) Zonificación de Valles de Inundación.

- (c) Regulaciones de Subdivisiones de la tierra.
- (d) Código de Edificación
- (e) Código de Aguas.
- (f) Ordenanzas de protección al medioambiente, calidad de agua, erosión.
- (g) Reglamentaciones para diseño de humedales, hábitat silvestre.
- (h) Políticas de Gestión de Drenaje Pluvial, Manual de Criterios.
- (i) Ordenanzas, Informes u otros documentos referidos Planificación de Uso de la tierra.
- (j) Planos estándares de obras hidráulicas (bocas de tormenta, cámaras, alcantarillas, etc.)
- (k) Especificaciones Técnicas Generales, Particulares y Especiales para diversos ítems involucrados en la construcción de obras hidráulicas.

6.10 ASPECTOS METODOLOGICOS DEL DISEÑO HIDROLÓGICO

Los estudios hidrológicos comprendidos en el diseño de sistemas de drenaje pluvial tienen por lo general como objetivo (uno o varios) la determinación de:

1. Caudal Máximo: caudal asociado a un cierto riesgo de ser igualado o superado. Se aplica al dimensionamiento de conductos, canales, alcantarillas, altura y luz de puentes, vertederos, zanjas, etc.
Caudal Mínimo: Abastecimiento humano, agrícola, etc.

2. Hidrograma de Proyecto: Secuencia de caudales de un evento asociado a una cierta probabilidad de ocurrencia. Se destaca la determinación de caudal máximo, volumen y distribución temporal. Se aplican al dimensionamiento de elementos del micro y macrodrenaje urbano, al movimiento en embalses y otros almacenadores de flujo, determinación de permanencias de inundaciones, interacción con cuerpos de agua mayor, propagación de crecidas.

3. Hidrograma de Máxima o de Mínima: Secuencia de caudales de presentación habitual y extrema. Los hidrogramas de máxima se aplican a la planificación del macrodrenaje: vías de desagüe extraordinarias, embalses, análisis de inundaciones catastróficas, estabilidad estructural de obras hidráulicas. Los hidrogramas de mínima se aplican a los procesos de movilización y removilización de contaminantes y sedimentos (calidad de agua): trampas de sedimentos, controles de entradas al sistema de conducto, planificación de mantenimiento, estudios de abastecimiento de agua para consumo humano o riego.

4. Evolución Temporal Continua de Caudales: Secuencia temporal continua de caudales y alturas de flujo. Aplicación en el balance hidrológico anual: variaciones de humedad del suelo, controles de sistemas de drenaje a tiempo real (utilización de parte de la red como almacenadores, obras de infiltración exfiltración). Se aplican a análisis de efectos acumulativos en la cantidad y calidad de agua en cuerpos receptores, operación de embalses, sistemas de alerta hidrológico.

La Metodología a emplear en los estudios hidrológicos involucrados en el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano dependerá fundamentalmente de los aspectos como el Objetivo del Estudio, el Nivel de Precisión requerido, el Tipo de Información Disponible y el Tamaño de la Cuenca (Bertoni et al., 1995). En la figura siguiente se resumen para cada uno de los aspectos mencionados, las diversas variantes que influirán sobre la metodología a seguir en el diseño de sistemas de drenaje pluvial.

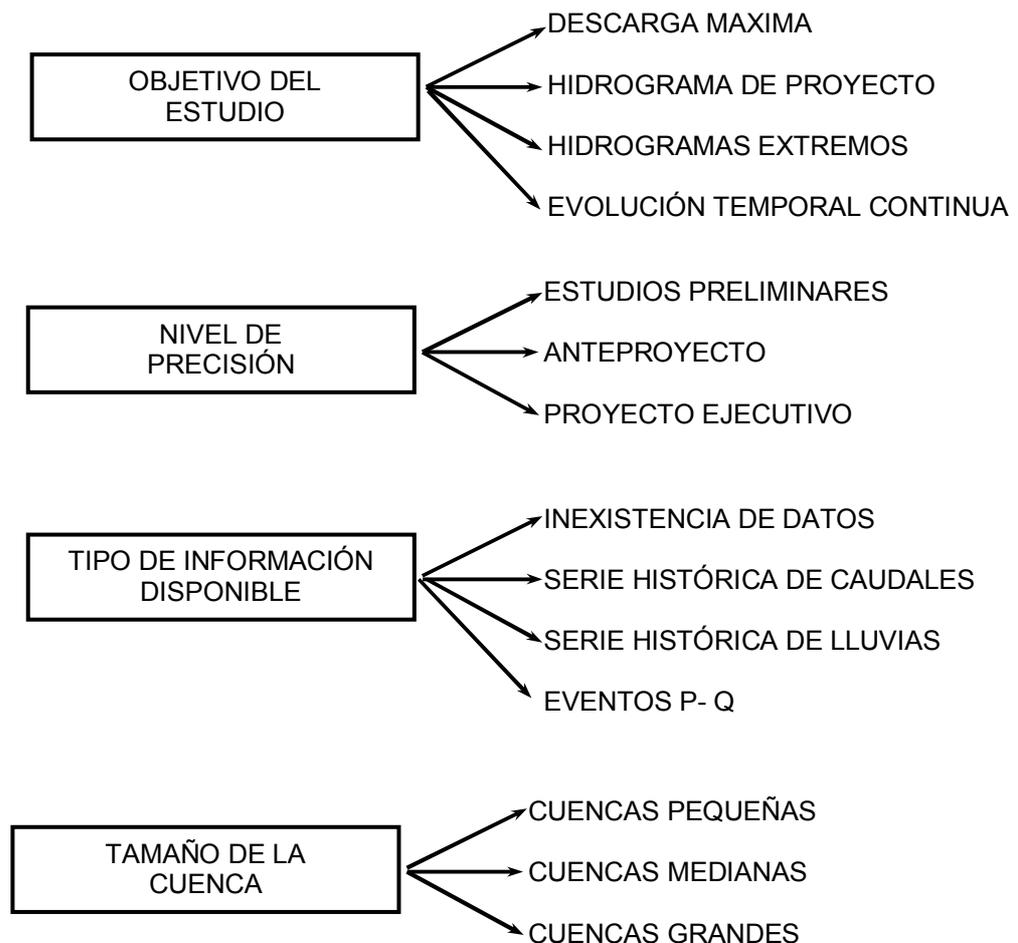


Figura 6.1. Aspectos Metodológicos de los Estudios Hidrológicos involucrados en Diseño de Sistemas de Drenaje Pluvial. Fuente: adaptación de Bertoni et al. (1995)

6.10.1 Líneas Metodológicas Básicas para el Dimensionamiento de Elementos del Sistema de Drenaje Pluvial

A continuación se presenta una síntesis de las líneas metodológicas básicas sugeridas ante distintos Objetivos del Estudio y ante diferentes Disponibilidades de Información (Bertoni et al., 1995). Los casos de objetivos considerados corresponden a (i) Caudal Máximo (caudal de diseño) y (ii) Hidrograma de Diseño (hidrograma de mínima o de máxima). A su vez en cada caso se plantean tres variantes de información disponible: (a) Cuenca Sin Datos; (b) Disponibilidad de Serie Histórica de Caudales y (c) Disponibilidad de Serie Histórica de Lluvias. Muchas de las técnicas sugeridas se encuentran en diversos capítulos del presente material. Para aquellas técnicas no incluidas se sugiere consultar a bibliografía como Chow (1964); Chow et al., (1994); Silber (1995); Bras y Rodríguez-Iturbe (1993); Salas et al. (1980).

(i) **Objetivo del Estudio: Descarga Máxima (Caudal de Diseño)** : consiste en la determinación de un valor de caudal máximo asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia, prescindiendo de la variación temporal de Q.

(i.a) Cuenca Sin Datos

Estimación de caudales : un estimación rápida y simplificada puede realizarse mediante la estimación en base a caudales específicos de cuencas conocidas con características semejantes $q(m^3/s/ha)$

Regionalización hidrológica: la regionalización puede involucrar a caudales máximos, mínimos y medios; Curvas IDR.

Aspectos metodológicos para la Regionalización:*Selección de estaciones**Análisis de frecuencias de la variable (relación con PMR)*

Relaciones a obtener:

1. Adimensionalización de las curvas de frecuencias.
2. *Regionalización de las curvas adimensionalizadas.*
3. *Regresión múltiple entre la variable utilizada para adimensionalizar y las características físicas y climáticas de las cuencas.*

*Regionalización de las funciones hidrológicas (curvas de permanencia)***(i.b) Serie Histórica de Caudales****# Estudios de frecuencia de valores extremos:** relación entre caudales y sus tiempos medios de retorno.**# Obtención de Q** asociado aun riesgo de falla asumido (recordar relación Recurrencia-Vida Útil y riesgo de falla en Capítulo 3)**# Aspectos de la metodología:**

Análisis estadístico. Tipos de series: anuales o parciales.

Estudio de independencia de los valores: año hidrológico.

Representatividad de los datos.

Estacionalidad de la serie y relación con acciones antrópicas:

- aumento de la urbanización
- aumento de la explotación agrícola
- construcción de terraplenes, diques (autopistas, ferrocarriles, rutas)

Utilización de marcas históricas (en limnímetros, puentes alcantarillas, viviendas).

Determinación de las distribuciones: empírica y teórica.

Utilización: cursos con medición sistemática de caudales (ríos de cierta importancia: Paraná, Carcarañá, Ao. Saladillo).**(i.c) Serie Histórica de Lluvias****# Estudios de frecuencia de lluvias intensas:** relación entre intensidades medias, tiempos de retorno y duración.**# Obtención de: P** asociada aun riesgo de falla asumido (y recurrencia)**# Aspectos de la metodología:**

Determinación y utilización de curvas IDR en áreas con pluviógrafos.

Desagregación de lluvias diarias, relación entre duraciones (áreas c/pluviómetros)

Aplicación de métodos simplificados para transformación lluvia-caudal (racional, otros)

Determinación de hietograma o tormenta de proyecto (Mét. SCS, Chicago, etc.)

Determinación de Hidrogramas Unitarios Sintéticos (HUS)

Eventualmente: uso de Hidrograma Unitario (HU)

Utilización: pequeñas cuencas urbanas y rurales que no poseen o posean escasos registros de caudales (Cuencas urbanas de Rosario, y regionales rurales Arroyo Saladillo, Pavón Ludueña, Frías, Seco, etc.).Nota: a pesar de que el objetivo no es la determinación del hidrograma de proyecto puede utilizarse cualquiera de las técnicas de HU o HUS para la determinación de la descarga máxima.**(ii) Objetivo del Estudio: Hidrograma de Diseño:** se trata de determinar un hidrograma (de máxima o de mínima) asociado a una probabilidad de ocurrencia.

(ii.a) Cuenca Sin Datos**# Técnicas de transposición de Hidrogramas Unitarios Sintéticos (HUS)**

Regionalización de Hidrogramas Unitarios (HU): aplicable a cuencas urbanas y rurales

Aspectos Metodológicos:

Definición del HUS medio para cada cuenca.

Utilización de ecuaciones de regresión del tipo: $y = a_1 x_1^b x_2^c x_3^d \dots x_n^m$ para correlacionar variables independientes y dependientes tales como:

Variables Independientes (y): Caudal pico (Qp); tiempo al pico (Tp); Tiempo base (Tb); Tiempos de 50% y 75% de caudal pico T_{W50} y T_{W75} .

Variables dependientes (x): Area cuenca (A); Perímetro (P); Longitud curso (L), longitud del curso al centro de gravedad (L_{CG}); pendiente media (S)

(ii.b) Serie Histórica de Caudales

Deben definirse:

- Caudal pico;
- Volumen (y duración total)
- Distribución temporal.

El riesgo de falla asociado debe corresponder a una de las tres variables

Método del Hidrograma Crítico:

Análisis de frecuencias de caudales máximos instantáneos y de los volúmenes de las crecidas máximas.

Determinación de variables para los PMR establecidos para diseño.

Selección del Hidrograma Crítico (HC).

Adimensionalización del HC (en función del caudal pico).

Determinación del hidrograma de proyecto: cada coordenada del hidrograma

se estima: $Q_{PROY i} = Q_{ADIM i} \times Q_{PMR}$ (seleccionado).

Ajuste de volúmenes y caudales.

Estudio estadístico de los hidrogramas

Selección de hidrogramas históricos con mayor 'semejanza' a valores de caudales determinados en análisis estadístico con el PMR seleccionado.

Utilización: cursos con medición sistemática de caudales (ríos de cierta importancia: Paraná, Carcarañá).

(ii.c) Serie Histórica de Lluvias

Es el enfoque más frecuente.

Obtención de la precipitación de diseño P : para el riesgo de falla asumido (y recurrencia). Alternativas de trabajo:

<i>Obra</i>	<i>Característica del estudio</i>
pequeña	En base a lluvia de la cuenca
mediana	Precipitaciones regionales
grande	Precipitación máxima probable (PMP)

Obtención de Hidrograma de proyecto: generalmente se asume como probabilidad de ocurrencia del hidrograma a la de la lluvia asociada.

1. Discretización de la cuenca.
2. Determinación de las precipitaciones o tormenta de proyecto.
3. Balance hidrológico. Pérdidas y Condiciones Iniciales.
4. Determinación de Escurrimiento Superficial (subsuperficial y subterráneo), tránsito de crecidas en el sistema colectores pluviales (conductos cerrados a presión atmosférica, excepcionalmente a presión).
5. Escurrimiento en ríos, canales, embalses y sistemas de drenaje pluvial urbano

Utilización: cuencas urbanas y rurales de diversos tamaños.

6.10.2 Clasificación de las Cuencas por su Tamaño (desde el punto de vista hidrológico)

(i) Cuencas Pequeñas

Las hipótesis que deben verificarse para considerar una cuenca como pequeña son:

- La intensidad de lluvia se asume uniforme en el tiempo y en el espacio.
- El escurrimiento se procesa básicamente sobre la superficie del terreno ("Overland flow")
- El proceso de almacenamiento en canales es despreciable
- La duración de las tormentas generalmente excede el tiempo de concentración

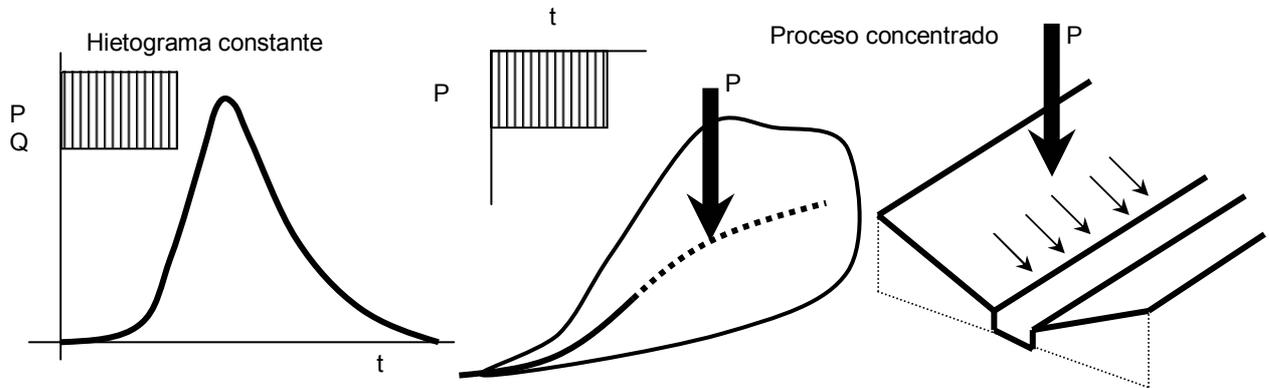


Figura 6.2. Cuenca Pequeña

Las técnicas hidrológicas a utilizar dependerán del grado de precisión requerida:

Técnicas Paramétricas: Método Racional (Variación lineal Lluvia-Caudal), Embalse Lineal, Hu y HUS.

Métodos Determinísticos más complejos: Onda cinemática

Límite entre cuencas Pequeñas y Medianas: el límite definido por diferentes autores entre una cuenca pequeña y una mediana está basado en el tiempo de concentración y en el área de la cuenca. En general el límite se define:

Por tiempo de concentración: $T_c < 1$ hora (criterio cuestionable)
 Por superficie de drenaje: 1 km^2 a 2.50 km^2

Si bien los valores presentados se verifican para gran cantidad de cuencas, el límite más preciso será aquel que asegure el cumplimiento de las hipótesis (a), (b), (c) y (d).

(ii) Cuencas Medianas

Las hipótesis que deben verificarse son:

- La intensidad de lluvia se asume uniforme en el espacio pero variable en el tiempo.
- El escurrimiento se considera sobre la superficie del terreno y a través de pequeños cursos de agua.
- El almacenamiento en canales es mínimo tendiendo a ser despreciable.

Las técnicas hidrológicas a utilizar dependerán si se admite considerar hietogramas constante en el tiempo:

Lluvia Uniforme en el Tiempo
 - Método Racional modificado

Lluvia Variable en El Tiempo
 - Hietograma de proyecto
 - Estimación de pérdidas
 - Métodos lineales. Embalse lineal. Hidrograma unitario (HU) y sintético (HUS)
 - Métodos no lineales. Onda Cinemática, Embalses No-lineales

El límite entre cuencas Medianas y Grandes es función del almacenamiento en cauce, por lo general se suele definir en $100 \text{ km}^2 = 10000 \text{ ha}$.

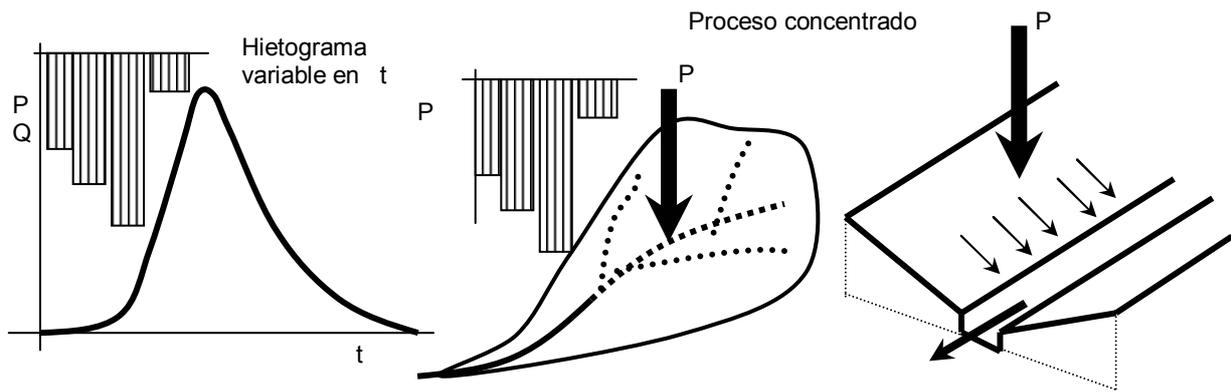


Figura 6.3. Cuenca Mediana

(iii) Cuencas Grandes

Hipótesis:

- (a) La intensidad de lluvia varía en el espacio y en el tiempo.
- (b) El proceso de almacenamiento en cauces es importante produciendo la atenuación de la onda de crecida (en caudales y alturas).

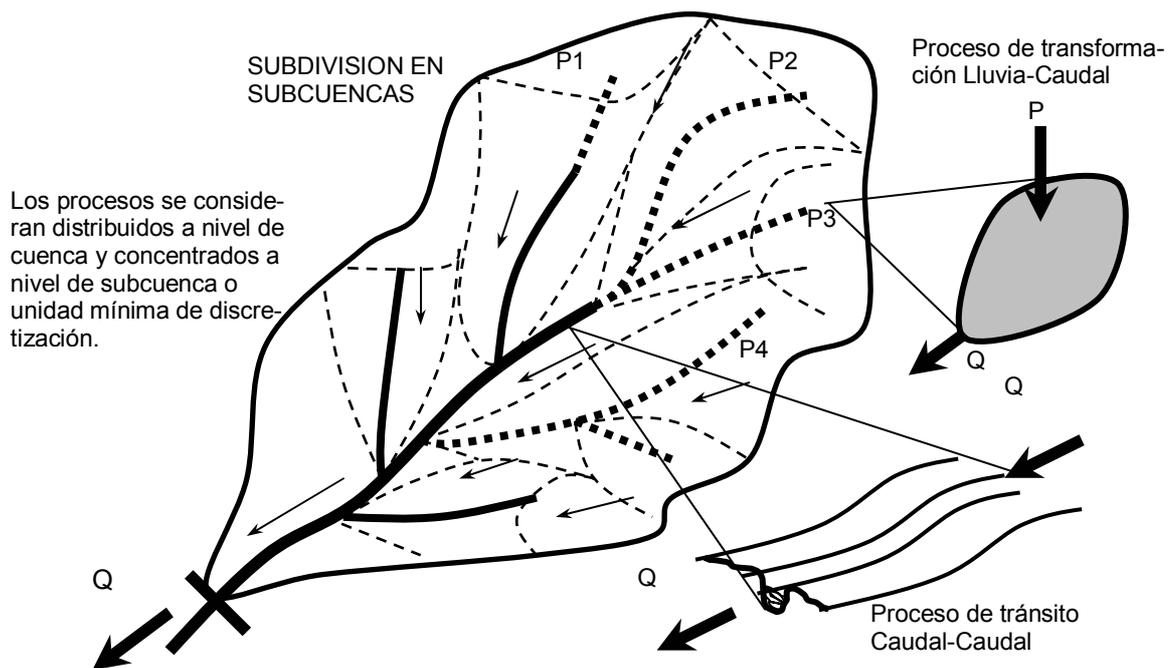


Figura 6.4. Cuenca Grande

Los hietogramas de diseño en cada subcuenca responderán a los patrones de isoyetas, o a la distribución areal de lluvias observada o definida mediante un modelo areal de lluvias (Riccardi y Zimmermann 2004).

El almacenamiento en cauces puede caracterizarse en forma transversal y longitudinal. El almacenamiento transversal se manifiesta por los procesos de intercambio río-valle de inundación. El almacenamiento longitudinal tiene como principal variable la pendiente longitudinal del curso de agua. En cuencas grandes a medida que disminuye la pendiente longitudinal se producen fuertes procesos de atenuación de la crecida en tránsito.

Técnicas a utilizar:

Subdivisión en Cuencas y Subcuencas.

Descripción de la transformación Lluvia-Caudal en cada unidad de discretización.

Descripción de procesos de tránsito Caudal-Caudal en ríos, embalses, puentes, alcantarillas, conductos, etc.

En la Figura 6.5 se esquematiza una unidad de subdivisión o sector de una cuenca considerada grande. Cada sector puede contener componentes participantes en la generación y propagación de escurrimiento diferenciados. En primer lugar la lluvia precipita sobre las áreas de aporte, donde mayormente se desarrolla la transformación lluvia neta-caudal, generándose escurrimiento mantiforme o del inglés "overland", el segundo componente los conforman las vías de desagües temporarias (cañadones, canales, etc.) y el tercer componentes es el curso de agua de mayor jerarquía, mayormente colector del agua generada en el sector. En las planicies puede considerarse la lluvia un proceso concentrado en un punto y la salida representará la entrada a los cursos de agua receptores del escurrimiento de las planicies. En las planicies puede ser necesario representar un procesos de traslado y atenuación por el tránsito mismo sobre la planicie. En los sectores de cursos de agua los hidrogramas entrantes transitan por el tramo, produciéndose una atenuación de los mismos.

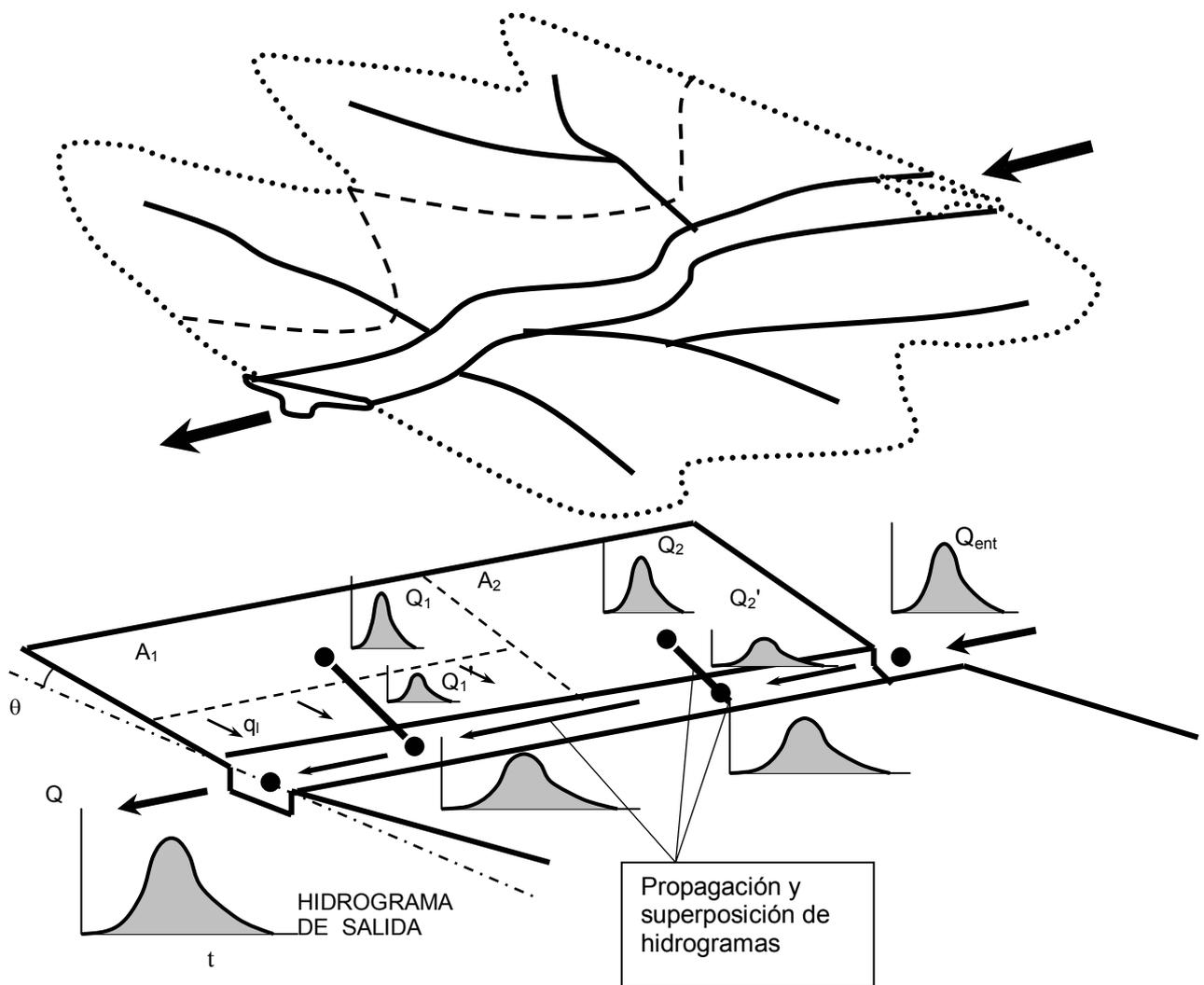


Figura 6.5. Discretización de un Sector de una Cuenca Grande

Las cuencas urbanas son en general pequeñas o medianas. No obstante el estudio hidrológico de una cuenca grande puede ser necesario en problemas de drenaje pluvial urbano cuando por ej. el escurrimiento generado en la cuenca grande interactúa hidrológica e hidráulicamente con el sistema urbano.

Los estudios hidrológicos en cuencas grandes solo son posibles mediante técnicas de modelación matemática.

6.10.3 Escalas de Abordaje y Niveles de Detalle en el Drenaje Pluvial

Dependiendo del objetivo del estudio la escala de abordaje de un determinado sistema de drenaje pluvial puede variar desde la escala domiciliaria (por ej. producción de escurrimiento domiciliario), escala de boca de tormenta, escala de gran conducto o emisario o a escala de un río (Figura 6.6).

Si bien en términos teóricos un simple modelo hidrológico puede aplicarse en todas las escalas, existen evidencias que las grandes cuencas responden menos directamente ante las señales de entrada (lluvias) que las pequeñas, debido al efecto de promediado de muchos procesos y componentes existentes en grandes cuencas. Si las características del escurrimiento en cuenca pudieran ser explicadas matemáticamente usando fractales (pequeñas subcuencas con similares patrones de comportamiento hidrológico e hidráulico) u otros medios, los procesos de modelado podrían ser simplificado y unificados para aplicación en todas las escalas (Riccardi, 2001).

Nivel de detalle: en áreas de 1 km^2 aproximadamente en promedio existen 100000 elementos (1000 elementos por hectárea) constitutivos de los sistemas de drenaje pluvial, entre los que se cuenta secciones de techos, canaletas, conductos, cámaras, sumideros, zanjas, cunetas, etc. Obviamente la única forma de contemplar gran cantidad de componentes del sistema es mediante modelos matemáticos de simulación. Si bien las capacidades de computadoras son muy grandes es imposible representar al detalle individual de cada elemento. Para aumentar el nivel de detalle es necesario la desagregación de los procesos y la utilización de modelos de simulación que permitan tal desagregación. En la Figura 6.7 se muestran 3 diferentes planteos de niveles de detalle. El primer caso corresponde a considerar una cuenca como un elemento simple donde todos los procesos son concentrados y el caudal se evalúa solamente en la sección de salida. El segundo nivel corresponde a una subdivisión en subcuencas (pudiendo corresponder a subcuencas de distintos conductos pluviales), en este caso en cada subcuenca se determinará cada hidrograma, los cuales son propagados por el cauce principal. El tercer caso a un nivel de detalle donde el escurrimiento se describe a nivel de aportes domiciliarios.

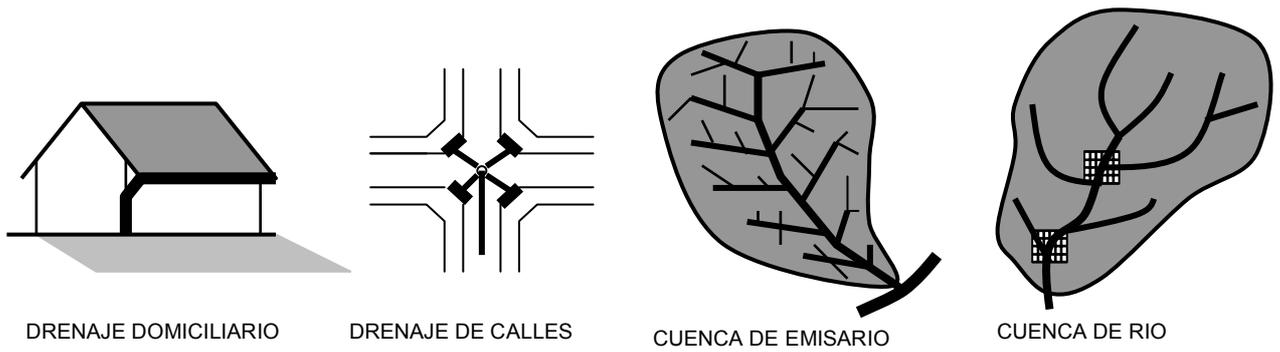


Figura 6.6. Distintas Escalas de Cuenca para Sistemas de Drenaje Pluvial Urbano

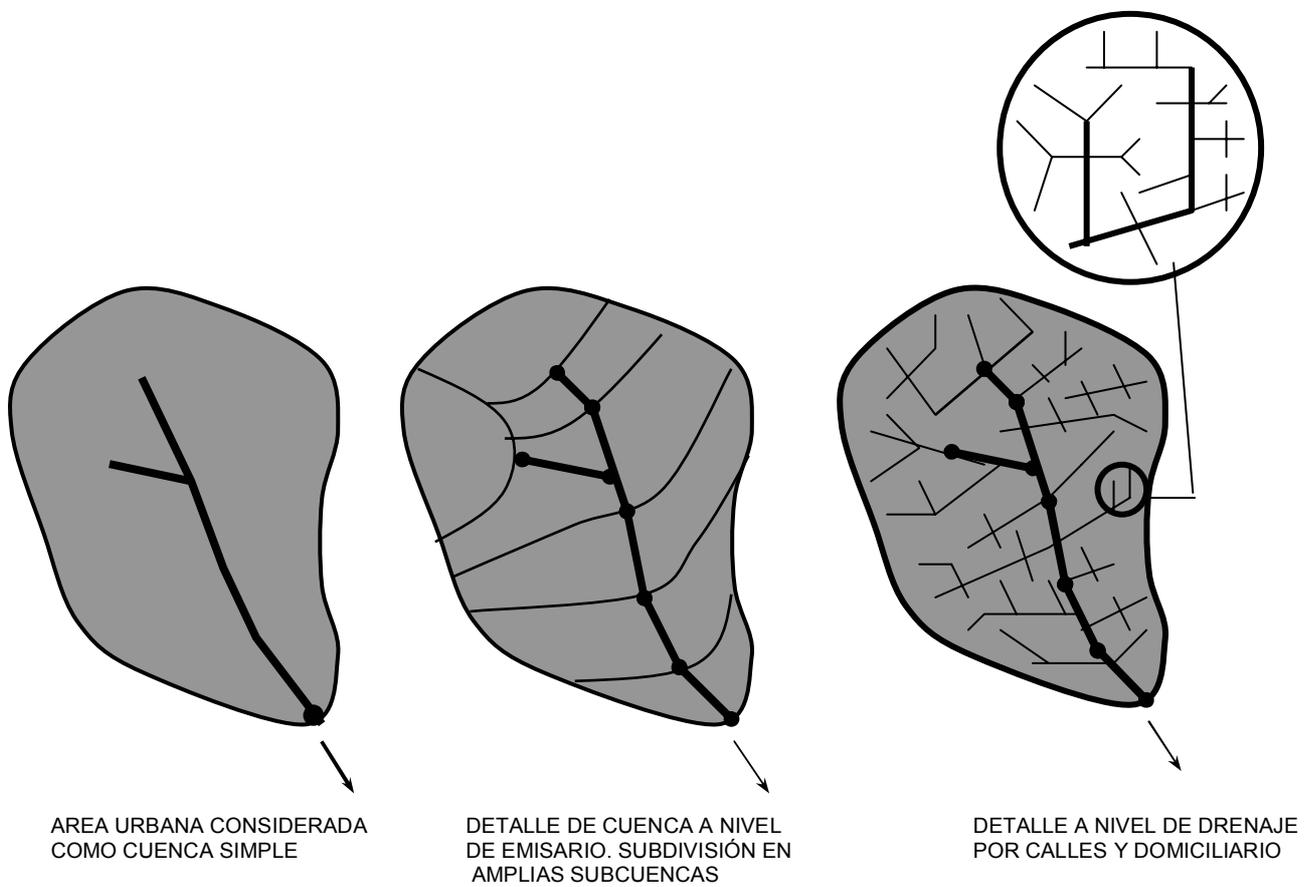


Figura 6.7. Niveles de Detalle de la descripción del mismo Sistema de Drenaje Urbano

6.11 BIBLIOGRAFÍA

- ASCE-WEF (American Society of Civil Engineers y Water Environment Federation) (1992), *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*, ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 77, WEF Manual of Practice FD-20; American Society of Civil Engineers, New York. 724p.
- Bertoni J., Pedraza R. Collins J., Macor J., Pusineri G., Ocampo C. Maza J. y Secchi A. (1995), Apuntes de Curso Sistemas de Drenaje Urbano, Fac. de Ingeniería, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. 300 p.
- Bras, R. and Rodriguez-Iturbe, I, (1993) *Random Functions and Hydrology*, Dover Pub., Inc, New York. 557 p.
- Bureau of Reclamation (1967), US Department of the Interior, *Diseño de Pequeñas Presas*, Edit. Limusa, México. 639 p.
- Chow, V. T., (1964), *Handbook of Applied Hydrology*, Mc Graw-Hill, New York. 900 p.
- Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L. (1994), *Hidrología Aplicada*, McGraw-Hill Interamericana, Buenos Aires. 584 p.
- Linsley R., Kohler M. y Paulus J., (1977), *Hidrología para Ingenieros*, Mc Graw Hill. 400 p.
- Riccardi, G., (2001), *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Inédito, Tesis Doctoral, FCEFyN, UNC, Córdoba. 279p.
- Riccardi, G. y Zimmermann, E. (2004), *Variación de la Respuesta Hidrológica de una Cuenca de Llanura ante distintos Modelos Areales de Lluvias*, XXI Cong. Latinoamericano de Hidráulica, San Pedro, Brasil. 10p.
- Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V and Lane, W., (1980), *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, Water Resources Publications, CO, EU. 484p.
- Secchi, A., Mazzón, R. Giacosa, R. y Bianchi, H., (2001), *Nuevas Tecnologías para Contribuir a la Soluciones de Inundaciones en Grandes Ciudades en Soluções para a Drenagem Urbana em Países da América Latina* (Villanueva, A., Goldenfum, J. y da Silveira, A., organizadores), IPH, Porto Alegre, Brasil. pp 144-158.
- Silber, M. (1995), *Análisis de los Sistemas Hidrológicos*, Notas de Curso de Posgrado de Hidrología Estocástica, Fac. de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. 307 p
- UDFCD (1967 a 1994), *Drainage Criteria Manual*, Vol. 1,2 y 3, Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado, EU. 750 p.