



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/009/15

Señor
CRISTOPHER OWEN MARTÍNEZ CUÉLLAR
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE SUDS: INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA URBANA PARA EL CONTROL Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA"

- INTRODUCCIÓN
- I. IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE CONVENCIONALES
- II. ENFOQUE ALTERNATIVO PARA LA GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA
- III. SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE SUDS
- IV. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO
- V. ESTADO DEL ARTE
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 11 de marzo del 2015.
EL PRESIDENTE

M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

Autorizado
para continuar
el trámite
de titulación

[Handwritten signature]

V. B.

[Handwritten signature]

V. B.

[Handwritten signature]

V. B.

[Handwritten signature]
9-04-15

V. B.

[Handwritten signature]
09-04-15.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE
SUDS: INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA URBANA
PARA EL CONTROL Y APROVECHAMIENTO DEL
AGUA DE LLUVIA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

CRISTOPHER OWEN MARTÍNEZ CUÉLLAR



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Enrique César Valdez**

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2015

Dedicada a mis padres.
Gracias por darme la oportunidad de ser un hombre libre.

Agradecimientos

A mi familia y amigos por acompañarme siempre en los momentos difíciles.

A mi director de tesis, Dr. Enrique César Valdez por su apoyo, orientación y tiempo.

A todos los profesores que a lo largo de mi vida se han esforzado por compartir su conocimiento.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por permitirme crecer como persona y como profesional.

A *Dalila*, la luz que ilumina mi camino, gracias por obsequiarme el hilo de Ariadna.

C.C.

Resumen

Los procesos de transformación propios de la urbanización en el último siglo han logrado colapsar los ciclos naturales, siendo el ciclo hidrológico uno de los que tienen consecuencias directas en la calidad de vida de los habitantes de las grandes ciudades. El uso de técnicas antiguas de manejo del agua de lluvia, las tendencias actuales de gestión sostenible de recursos y las nuevas tecnologías en materiales y procesos constructivos, han dado lugar a nuevos conceptos de urbanismo que incluyen el uso de sistemas urbanos de drenaje innovadores cuyo principio es recuperar y mantener el equilibrio hidrológico de la cuenca. Se presenta una revisión de la literatura actual que incluye el planteamiento de diversos modelos, criterios de diseño y herramientas de ayuda para la elección y evaluación de alternativas de drenaje sostenibles. Asimismo, se exponen ejemplos del uso de sistemas de administración de recursos hídricos urbanos alrededor del mundo basados en los principios del desarrollo sostenible que muestran beneficios significativos en cuanto a la cantidad y calidad del agua, aunque en otros países incluyendo México la experiencia aún es escasa.

Abstract

The proper urbanization transformation processes in the last decade have succeeded to collapse the natural cycles, the hydrological cycle being one of the directly affected in the quality of life of the inhabitants of the big cities. The use of the old techniques of rain water management, the actual tendencies of sustainable management of resources and the new technologies in materials and constructive processes, have given way to new concepts of urbanism that include the use of urban systems of innovative drainage whose principle is to recuperate and maintain the hydrological equilibrium of the basin. It presents a revision of the current literature that includes the approach of diverse models, design criteria and help tools for the election and evaluation of sustainable drainage alternatives. Likewise, examples are exposed of administrative system use of urban hydric resources around the world based on the principles of sustainable development that show significant benefits relating the quantity and quality of water, even though in other countries including Mexico the experience is still scarce.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	XV
Hipótesis	XVI
Justificación de la investigación	XVI
Objetivos	XVII
Alcance	XVIII
CAPÍTULO 1. Impactos ambientales de los sistemas de drenaje convencionales	1
1.1 Sistemas de drenaje convencionales	2
1.1.1 Definición de sistema de alcantarillado y componentes	2
1.2 Consecuencias de la urbanización en el ciclo hidrológico	3
1.2.1 Sobreexplotación de recursos hídricos	5
1.2.2 Relación lluvia-escurrimiento	7
1.3 Inundaciones urbanas	10
1.3.1 Principales causas de las inundaciones urbanas	12
1.4 Contaminación difusa de origen urbano	13
1.5 Escasez de agua potable en zonas urbanas	14
1.6 Situación en México	16
CAPÍTULO 2. Enfoque alternativo para la gestión del agua de lluvia	19
2.1 Antecedentes de la gestión del agua de lluvia	20
2.1.1 Registros históricos del uso del agua pluvial	22
2.1.2 Legislación	24
2.2 Urbanización de bajo impacto	25
2.3 Ciclo hidrológico urbano	27
CAPÍTULO 3. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS	29
3.1 Filosofía de los SUDS	30
3.1.1 Enfoque de sostenibilidad en los SUDS	32
3.2 Clasificación	33
3.2.1 Medidas no estructurales	34
3.2.2 Medidas estructurales	36

CAPÍTULO 4. Criterios generales de diseño	49
4.1 Tren de manejo	51
4.2 Sostenibilidad	53
4.3 Criterios hidráulicos	54
4.3.1 Características de una tormenta	54
4.3.1.1 Intensidad, duración, periodo de retorno	55
4.3.1.2 Calidad del agua de lluvia	58
4.3.2 Mecanismos de control cuantitativo	59
4.3.3 Mecanismos de control cualitativo	67
4.4 Limitaciones	76
4.4.1 Criterios de selección	77
CAPÍTULO 5. Estado del arte	81
5.1 Experiencias en el mundo	82
5.2 En México	88
5.3 Caso de estudio	90
5.4 Costos y beneficios de la implantación de SUDS	94
CAPÍTULO 6. Conclusiones	99
BIBLIOGRAFÍA	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Relación lluvia escurrimiento.	7
Figura 1-2. Número de inundaciones reportadas.	11
Figura 1-3. Hidrogramas de entrada y salida en cuencas con distinta respuesta hidrológica.	12
Figura 1-4. Inundación en la Ciudad de México.	18
Figura 1-5. Escasez de agua en la Ciudad de México.	18
Figura 2-1. Modelo del ciclo del agua urbana.	28
Figura 3-1. Enfoque de sostenibilidad SUDS.	32
Figura 3-2. Clasificación MINVU.	33
Figura 3-3. Clasificación GITECO.	33
Figura 3-4. Clasificación CIRIA.	34
Figura 3-5. Clasificación SUDS propuesta.	34
Figura 3-6. Pavimento poroso (derecha) y pavimento permeable (Izquierda).	37
Figura 3-7. Zanja de infiltración.	38
Figura 3-8. Cuenca de infiltración.	39
Figura 3-9. Dren filtrante o francés.	40
Figura 3-10. Cuneta Verde.	41
Figura 3-11. Franja filtrante.	42
Figura 3-12. Cubiertas vegetadas.	43
Figura 3-13. Cuenca de detención.	45
Figura 3-14. Estanque de retención.	45
Figura 3-15. Humedal artificial.	46
Figura 3-16. Humedal artificial de flujo subsuperficial.	47
Figura 3-17. Humedal artificial de flujo vertical.	47
Figura 4-1. Tren de manejo SUDS.	52
Figura 4-2. Ejemplo de curvas $i-d-T$.	57
Figura 4-3. Capacidad de infiltración según Horton.	61
Figura 4-4. Procesos unitarios para el tratamiento de agua de lluvia en un SUDS.	67
Figura 4-5. Relación entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds.	69
Figura 4- 6. Diagrama de flujo del proceso de selección SUDS.	78
Figura 5-1. Parque tecnológico de St. Priest, Lyon Francia.	83

Figura 5-2. Parque Rabalder de Roskilde, Dinamarca.	84
Figura 5-3. Sistema de canales y estanques en Augustenborg, Suecia.	84
Figura 5-4. Aeropuerto Internacional Stewart de Nueva York.	86
Figura 5-5. SUDS en Dockland Park, Melbourne Australia.	87
Figura 5-6. Ciudad de Curitiba en Brasil.	88
Figura 5-7. Humedal artificial, viveros de Coyoacán.	89
Figura 5-8. Azotea verde del edificio del INFONAVIT.	89
Figura 5-9. Distrito Federal, el Pedregal de San Ángel, Ciudad Universitaria y la REPSA.	91
Figura 5-10. Ejemplo del análisis geodemográfico.	92
Figura 5-11. Perfil conceptual de gastos SUDS.	95

ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS

Tabla 1-1. Grandes ciudades bajo estrés hídrico.	6
Tabla 1-2. Valores representativos del coeficiente de escurrimiento.	9
Tabla 1-3. Coeficiente de impermeabilidad.	10
Tabla 1-4. Contaminación arrastrada por la lluvia dependiendo de las características de la zona.	13
Tabla 1-5. Clasificación de la disponibilidad de agua.	15
Tabla 1-6. Resumen de la infraestructura de drenaje en operación en la Ciudad de México.	17
Tabla 2-1. Etapas de desarrollo de los sistemas de drenaje urbano en países de primer mundo.	21
Tabla 4-1. Contaminantes adquiridos durante el lavado atmosférico.	59
Cuadro 4-1. Valores del coeficiente de arrastre.	70
Cuadro 4-2. Relación de contaminantes y mecanismos de eliminación recomendados.	75
Cuadro 5-1. Prototipos propuestos relativos a la gestión de los escurrimientos.	93

INTRODUCCIÓN

La urbanización incluye un conjunto de procesos mediante los cuales se transforma el entorno natural con el propósito de hacerlo habitable para los seres humanos. Esta transformación no siempre resulta del todo beneficiosa, los cambios que en un principio tienen como objetivo brindar vivienda y servicios a la población han terminado por colapsar los ciclos naturales teniendo como consecuencia un importante desequilibrio en la disponibilidad y calidad de recursos afectando significativamente uno de los más importantes para sustentar la vida, el agua.

La realidad de un alto porcentaje de la población en zonas urbanas refleja la dualidad de esta problemática pues, por un lado, existe escasez de agua en tiempo de estiaje mientras que en época de lluvia se producen inundaciones en mayor o menor grado y con consecuencias de distintas magnitudes. Ambas problemáticas, pese a parecer contradictorias, tienen un punto en común, la deficiente administración de los recursos hídricos urbanos.

Desde la llegada de los grandes sistemas de bombeo y redes de suministro de agua potable por medio de tuberías bajo tierra, el agua de lluvia, que desde el principio de la civilización fue fuente de abastecimiento para la humanidad, dejó de considerarse como un recurso aprovechable. Las grandes ciudades demandan gigantescas cantidades de agua dulce, al mismo tiempo, provocan un enorme impacto ambiental sobre dicho recurso. La explosión demográfica representativa de finales del siglo XX y cuya tendencia continua actualmente, a mostrado cuán falible es el modelo tradicional de abastecimiento y drenaje urbano.

Adicionalmente, el incumplimiento de la legislación y normatividad en materia de agua y la escasa cultura ambiental de los usuarios vuelve particularmente vulnerable a este preciado recurso generando un uso desmedido en prácticamente todas las actividades humanas. La tendencia actual en administración sostenible de recursos derivada de la necesidad de un nuevo enfoque cuyo propósito es mitigar el impacto ambiental del crecimiento de los asentamientos urbanos, ha traído consigo el desarrollo de tecnologías novedosas enfocadas a lograr una integración entre la infraestructura urbana y el entorno natural.

Hipótesis

Los sistemas de drenaje utilizados comúnmente en las grandes ciudades para el manejo de aguas residuales y pluviales plantean un enfoque equivocado.

La nueva tendencia en administración sostenible de recursos alrededor del mundo a propiciado el desarrollo de sistemas que pretenden atenuar las alteraciones provocadas por las actividades humanas sobre los procesos naturales. Los sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS incluyen una amplia gama de soluciones técnicas que permiten a los ingenieros diseñar infraestructura habilitada para el manejo sostenible de los recursos hídricos en una cuenca urbanizada. Los SUDS han mostrado, hasta este momento, tener el potencial de disminuir el riesgo de inundaciones urbanas al mismo tiempo que posibilitan el uso y almacenamiento de agua que antes era desaprovechada. La falta de experiencia en estos sistemas no ha permitido aun su uso generalizado; el desarrollo e investigación en la materia posibilitaría su aplicación a gran escala.

Justificación de la investigación

Desde hace siglos el propósito de la ingeniería civil ha sido proporcionar una mejor calidad de vida a la población mediante la planeación, el diseño y construcción de infraestructura como vivienda, caminos, puertos, aeropuertos, diques, etc. Sin embargo, la construcción de grandes obras de ingeniería puede incluirse entre las actividades humanas que más transforman negativamente el ambiente, causando impactos que son cada día evidentes. Por lo tanto es responsabilidad de las nuevas generaciones de ingenieros hacer un cambio en los paradigmas, buscando soluciones innovadoras que tengan como finalidad la integración de la infraestructura con el entorno natural.

El uso de sistemas de alcantarillado convencionales para el manejo del agua pluvial trae consigo impactos adversos sobre el ciclo hidrológico al modificar la respuesta de la cuenca ante un evento de precipitación. Este enfoque favorece el transporte y acumulación aguas abajo de los volúmenes precipitados así como el lavado de contaminantes de las superficies permeables generando impactos ambientales relacionados con el agua en cuanto a su calidad y cantidad.

El propósito fundamental de este trabajo fue explicar los inconvenientes de los sistemas convencionales de alcantarillado pluvial y, en comparación, las tendencias de gestión sostenible de los recursos hídricos en zonas urbanas que están siendo adoptadas actualmente en el mundo, analizando su pertinencia y limitaciones en su aplicación.

Objetivos

General:

- Mostrar los aspectos más relevantes acerca de la tendencia en infraestructura hidráulica urbana enfocada a la administración sostenible de recursos hídricos, denominada sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) y analizar los criterios generales de planeación, diseño y operación de éstos sistemas como medio de control de la cantidad y calidad del agua de lluvia con fines de aprovechamiento en cuencas con alto grado de urbanización.

Particulares:

- Identificar los impactos ambientales derivados del proceso de urbanización en una cuenca.
- Analizar el funcionamiento de los sistemas convencionales de alcantarillado pluvial.
- Mostrar la relación entre el proceso de urbanización y los fenómenos de contaminación difusa e inundaciones urbanas.
- Analizar la factibilidad del aprovechamiento del agua de lluvia como solución al problema de escasez de agua potable en zonas urbanas.
- Describir las experiencias de aprovechamiento del agua de lluvia en distintos proyectos de sistemas urbanos de drenaje sostenible.
- Difundir la cultura de sostenibilidad en materia de recursos hídricos urbanos.

Preguntas clave

- 1) ¿Cómo gestionar el agua de lluvia en las grandes ciudades?
- 2) ¿El agua de lluvia es solución para el problema de escasez en zonas urbanas?
- 3) ¿Qué relación existe entre el crecimiento urbano y el riesgo de inundaciones?
- 4) ¿Es posible la integración de los SUDS en el entorno urbano?

Alcance

Se identifican las problemáticas derivadas del uso generalizado de los sistemas de drenaje convencionales y se analizan los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible como su posible solución, así como sus limitaciones en diseño, proceso constructivo y sostenibilidad.

Para ello este trabajo se estructuró en cinco capítulos. En el primer capítulo, titulado *Impactos ambientales de los sistemas de drenaje convencionales*, se analizan los efectos adversos derivados del proceso de urbanización, particularmente, los aspectos que repercuten directamente en el ciclo hidrológico, y por lo tanto, en la disponibilidad y calidad de agua en una ciudad. Se distinguen tres impactos asociados al uso de los sistemas de drenaje convencionales: las inundaciones, la contaminación difusa y la escasez de agua potable en zonas urbanas.

En el segundo capítulo *Enfoque alternativo para la gestión del agua de lluvia*, se muestran de manera breve, antecedentes históricos del uso del agua de lluvia, los principios generales en que se basa el enfoque sostenible para su administración, y la legislación que regula su uso.

El capítulo tres *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS* expone el conjunto de sistemas orientados a la gestión del agua de lluvia derivados de la tendencia mundial en administración sostenible de recursos, distintos criterios de clasificación y una descripción de sus características más importantes.

El cuarto capítulo *Criterios generales de diseño* presenta los principios fundamentales bajo los cuales se basa el funcionamiento de los elementos estructurales mostrados en el capítulo anterior que han sido desarrollados en el mundo así como sus limitaciones y criterios de selección.

Por último el capítulo 5 *Estado del arte* muestra la situación actual de los sistemas urbanos de administración sostenible del agua de lluvia, en México y en el mundo, algunos ejemplos de su aplicación y los resultados obtenidos a partir de su implantación.

CAPÍTULO 1

Impactos ambientales de los sistemas de drenaje convencionales

La falta de un enfoque sostenible en la gestión del agua tiene consecuencias que pese a la falta de difusión no pueden ser negadas. Los problemas relacionadas con el suministro de agua potable y saneamiento en las grandes ciudades son cada vez más evidentes y requieren de soluciones novedosas que cumplan con los requisitos del desarrollo sustentable.

Los sistemas de drenaje convencionales provocan alteraciones de los medios físico y socioeconómico; en el primer caso, el componente afectado es el agua, en lo relativo a cantidad y calidad. En el segundo caso, el componente afectado son los servicios públicos. Los impactos relativos a la cantidad del agua son los más evidentes ya que su incidencia es visible y notable en el momento en el que se producen; por ejemplo, las inundaciones localizadas. Por su parte los problemas referentes a la calidad del agua no son detectables a simple vista, y su perjuicio se manifiesta a medio o largo plazo, pudiendo alterar ecosistemas completos. Finalmente, el servicio brindado a la población se ve afectado a causa de lo anterior en la medida en que su calidad de vida se ve afectada (Rodríguez et al., 2008).

Los riesgos de inundación y el deterioro de la calidad del agua en los ríos de las ciudades de países en desarrollo y desarrollados, ha sido un escenario predominante a finales del siglo XX e inicio del siglo XXI, cuyo origen está, según algunos investigadores, en una visión equivocada del control de las aguas pluviales por parte de la comunidad y de los profesionales (Tucci, 2006). Un enfoque distinto sostiene que si los sistemas de control y aprovechamiento de agua de lluvia se incluyeran ampliamente en el diseño y en la normativa urbanística se ahorraría agua potable, se prevendrían inundaciones, sequías y riesgos de deslave en zonas de laderas inestables. La gestión planificada del agua de lluvia mitiga y previene desastres anunciados (Pacheco, 2009).

1.1 Sistemas de drenaje convencionales

Desde hace mucho tiempo el método para conducir los escurrimientos superficiales fuera de una zona urbana ha sido mediante tuberías subterráneas. El funcionamiento de este sistema es ya conocido dado que prácticamente es utilizado en todas las grandes ciudades en el mundo, no obstante, los efectos adversos asociados a su uso generalizado no son del todo reconocidos.

El objetivo de los sistemas de drenaje convencionales utilizados para manejar los recursos hídricos urbanos, es movilizar volúmenes de aguas servidas y de lluvia desde los centros poblacionales hasta un sitio en donde no exista la posibilidad de perjuicio para los usuarios. Las consecuencias de realizar los proyectos para lograr únicamente dicho objetivo son el aumento en el riesgo de inundaciones, la contaminación de recursos que podrían ser aprovechados y paradójicamente la escasez de agua potable en zonas densamente pobladas.

En tiempos recientes se han planteado algunas objeciones a éste esquema debido a los impactos ambientales adversos que produce sobre el sistema natural de drenaje aguas abajo, fundamentalmente por el aumento en el riesgos de inundaciones y el deterioro de la calidad del agua. Se cuestiona también que el sistema convencional afecta el balance hídrico natural, causa efectos de choque por la descarga concentrada de contaminantes, erosión y sedimentación en los cauces y contribuye al mal funcionamiento de la infraestructura urbana existente.

1.1.1 Definición de sistema de alcantarillado y componentes

La CONAGUA (2007) define los sistemas de alcantarillado de la siguiente manera:

“Un sistema de alcantarillado está constituido por una red de conductos e instalaciones complementarias que permiten la operación, mantenimiento y reparación del mismo. Su objetivo es la evacuación de las aguas residuales y pluviales, que escurren sobre calles y avenidas, evitando con ello su acumulación y propiciando el drenaje de la zona a la que sirven. De ese modo se impide la generación y propagación de enfermedades relacionadas con aguas contaminadas.”

Los sistemas se clasifican como sanitarios cuando conducen solo aguas residuales, pluviales cuando transportan únicamente aguas producto del escurrimiento superficial del agua de lluvia y combinados cuando mezclan los dos tipos de aguas, siendo éstos últimos los de uso mas común alrededor del mundo. El tipo de alcantarillado que se use dependerá de las características de tamaño, topografía y condiciones económicas del proyecto (CONAGUA, 2009b).

Los componentes principales de un sistema de alcantarillado se agrupan según la función para la cual son empleados. De éste modo, un sistema de alcantarillado sanitario, pluvial o combinado, esta integrado por los siguientes elementos:

- Estructuras de captación
- Estructuras de conducción
- Estructuras de conexión y mantenimiento
- Estructuras de vertido
- Instalaciones complementarias
- Disposición final

No obstante su uso generalizado, los modelos tradicionales de gestión de aguas urbanas no han logrado discriminar entre las distintas calidades del agua, ni identificar usos para las mismas. Los sistemas convencionales de drenaje están diseñados para evitar las inundaciones a nivel local al conducir el agua lo más rápido posible fuera de cierta zona sin considerar sus características cualitativas. Comúnmente, la escorrentía superficial generada por una tormenta se combina con los flujos de aguas residuales a través de una sola red de alcantarillado combinado, de esta forma, los escurrimientos pueden representar una carga impredecible y excesiva para la infraestructura de tratamiento.

1.2 Consecuencias de la urbanización en el ciclo hidrológico

Debido al acelerado crecimiento urbano no planificado, a la mayor vulnerabilidad al cambio climático, y las relativamente insuficientes prácticas de gestión del agua, muchas ciudades enfrentan problemas de escasez, contaminación de cuencas e incremento de inundaciones, que afectan directamente la calidad de vida de su población (Banco Mundial, 2012).

La urbanización es un concepto amplio que involucra cambios sociales, políticos y económicos. Desde el punto de vista de la demografía, es un proceso que tiende a concentrar a las personas, movilizandó la población de las zonas rurales a los lugares en donde se concentran los servicios. Éste proceso plantea una serie de desafíos críticos relacionados con el agua, desde el acceso a los servicios básicos hasta la seguridad ambiental y humana.

De acuerdo con el informe de la ONU sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (WWAP, 2011), actualmente la mitad de la población vive en zonas urbanas y se estima que a mediados de este siglo, todas las regiones serán predominantemente urbanas con excepción de África Oriental que alcanzará este punto después del año 2050. Adicionalmente, es importante considerar, tal y como sostienen Cabrera & Méndez (2012),

que el 75% de la población urbana vive en grandes ciudades, y que ésta, a su vez, tiende a concentrarse día a día en pequeñas porciones de terreno como son los grandes rascacielos, siendo éstas construcciones las que dictan la tendencia de infraestructura hidráulica y eléctrica mundial. El suministro de agua potable y el desalojo de aguas residuales, son aspectos fundamentales para el funcionamiento de una ciudad, por lo que las ciudades tienden a convertirse en si mismas en importantes unidades de gestión de los recursos hídricos.

En una gran ciudad los retos en la gestión del agua son abundantes. En los países considerados como desarrollados, hay todavía una parte significativa de la población que no tiene acceso al suministro de agua y saneamiento adecuados. Al mismo tiempo, el crecimiento demográfico, la urbanización y la industrialización siguen causando la contaminación y el agotamiento de las fuentes de agua. Paradójicamente, este hecho a dado lugar a las gigantescas obras de ingeniería construidas para desalojar el agua de una cuenca y evitar inundaciones, y simultáneamente la ejecución de obras de igual magnitud para introducir agua para consumo humano a partir de las cuencas hidrológicas contiguas (Breña, 2004).

El agua es un recurso esencial para los ecosistemas naturales y la regulación del clima, pero su disponibilidad resulta particularmente vulnerable. Los científicos advierten de un posible incremento del riesgo de sequías y de inundaciones en las próximas décadas (Comisión Europea, 2010). Conforme los asentamientos humanos crecen en tamaño y la densidad poblacional aumenta de forma desmesurada el ciclo hidrológico se ve alterado gravemente, ya que, la rectificación de cauces, la extracción de grandes volúmenes para el consumo, la deforestación, la erosión y otras actividades propias del proceso de urbanización afectan la capacidad de retención y procesos de circulación naturales.

El ciclo hidrológico en condiciones previas a la urbanización es un delicado conjunto de procesos que mantiene al vital liquido en movimiento, estos procesos no solo transportan el agua de un lugar a otro, también incluyen una serie de transformaciones físicas y químicas, Chow (1994) lo explica de la siguiente manera: El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmosfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmosfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre y los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial, infiltrarse en el suelo, correr a través de él como flujo subsuperficial y descargar en los ríos. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmosfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emergen manantiales o se desliza hacia ríos para formar escurrimiento superficial y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmosfera a medida que el ciclo hidrológico continua.

Cuando el hombre actúa sobre este sistema y se concentra en el espacio produce alteraciones severas, causando impactos significativos de carácter irreversible en el propio hombre y en la naturaleza. La urbanización influye en la hidrología de un lugar al cambiar las características espaciales y temporales de los procesos hidrológicos; uno de los principales impactos es el riesgo de escasez cuantitativa del agua. La naturaleza ha mostrado que la disponibilidad de agua es aleatoria y varía mucho entre las épocas de lluvia y estiaje. Además la urbanización densa y el desarrollo afectan directamente la infiltración al aumentar las superficies impermeables, como resultado, gran parte de los volúmenes precipitados se convierten en escurrimientos superficiales, siendo esta la principal fuente de contaminación de los cuerpos receptores (Tucci, 2006 y Sharma, 2008).

No obstante, el tercer Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, publicado en 2009, indica que los problemas relativos al agua en las ciudades del mundo son *manejables* (ONU, 2010). Gran parte de los conocimientos necesarios, la experiencia y la tecnología ya está disponible, sin embargo, es esencial incluir estos problemas en las agendas regionales, nacionales e internacionales.

1.2.1 Sobreexplotación de recursos hídricos

Las megaciudades requieren recursos naturales y generan residuos en cantidades nunca vistas hasta ahora en la historia de la humanidad. La expansión urbana incide directamente en la disponibilidad y calidad del agua, las ciudades en crecimiento tienen una mayor demanda de dicho recurso por persona y tienden hacia organizaciones institucionales difíciles de manejar (WWAP, 2011).

Algunas de las ciudades de más rápido crecimiento en el siglo XXI se encuentran en zonas con una limitación geográfica en la disponibilidad de agua, es decir, que las fuentes de abastecimiento son de difícil acceso. Una evaluación de todas las grandes ciudades con limitación geográfica severa, muestra que la mayoría de ellas se encuentran en países en desarrollo, especialmente enfocados en China, Asia Central, y México como muestra la Tabla 1-1 (McDonald et al., 2014).

Debido a la rápida urbanización, las ciudades se enfrentan a una creciente demanda de servicios de agua y saneamiento. Para satisfacer esta demanda, las ciudades van cada vez "*más profundo y más lejos*" con la finalidad de encontrar agua dulce (ONU, 2010). Este hecho tiene como consecuencia la sobreexplotación de las fuentes locales, generalmente subterráneas, y el traslado de agua de una cuenca a otra. La sobreexplotación de agua es un fenómeno mundial ligado al desmesurado crecimiento poblacional que se produce cuando se extrae un caudal mayor al que existe para la recarga rompiendo el equilibrio ecológico de la fuente de abastecimiento.

Tabla 1-1. Grandes ciudades bajo estrés hídrico.

Zona urbana	País	Población (2010)
Tokyo	Japón	36,933,000
Delhi	India	21,935,000
Ciudad de México	México	20,142,000
Shanghai	China	19,554,000
Beijing	China	15,000,000
Kolkata	India	14,283,000
Karachi	Pakistán	13,500,000
Los Angeles	Estados Unidos	13,223,000
Rio de Janeiro	Brasil	11,867,000
Moscú	Rusia	11,472,000
Estambul	Turquía	10,953,000
Shenzhen	China	10,222,000
Chongqing	China	9,732,000
Lima	Perú	8,950,000
Londres	Reino Unido	8,923,000
Wuhan	China	8,904,000
Tianjin	China	8,535,000
Chennai	India	8,523,000
Bangalore	India	8,275,000
Hyderabad	India	7,578,000

Fuente: Adaptado de McDonald et al. 2014

El grado de presión sobre un recurso hídrico, o estrés hídrico, se emplea en muchas valoraciones del agua para obtener un calculo aproximado del nivel de explotación que tienen los ciudadanos sobre las fuentes de abastecimiento de agua. El estrés hídrico severo es definido como el momento en el que las extracciones de agua superan el 40% de los recursos renovables y cuanto más alto sea su valor, más probable será que se produzcan periodos de escasez (CONAGUA, 2009a).

Los efectos físicos de la sobreexplotación pueden variar, algunas consecuencias son alarmantemente claras, como la desecación de las fuentes superficiales de agua como ríos y lagos y el deterioro acelerado de los ecosistemas que dependen principalmente del agua, mientras que otros son menos visibles como la disminución en el nivel de la capa freática.

De acuerdo con Aguirre (2010), la única fuente renovable de agua potable reside en la lluvia; sin embargo, en algunas regiones la explotación es tan intensa que los recursos con los que se cuenta están evaporándose y las reservas subterráneas se agotan a un ritmo más acelerado que el de la cantidad recibida por las precipitaciones pluviales. El agua potable en términos per cápita disminuye a pasos agigantados mientras que, a nivel mundial, el consumo se duplica cada 20 años, ritmo poco más de dos veces mayor al crecimiento de la población.

1.2.2 Relación lluvia-escorrimento

En hidrología el escurrimento se define como el agua que viene de la precipitación y que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para luego ser drenada hasta la salida de la cuenca. Según el curso que sigue el agua después de llegar a la superficie terrestre, el escurrimento puede ser: subterráneo, subsuperficial o superficial como esquematiza la Figura 1-1.

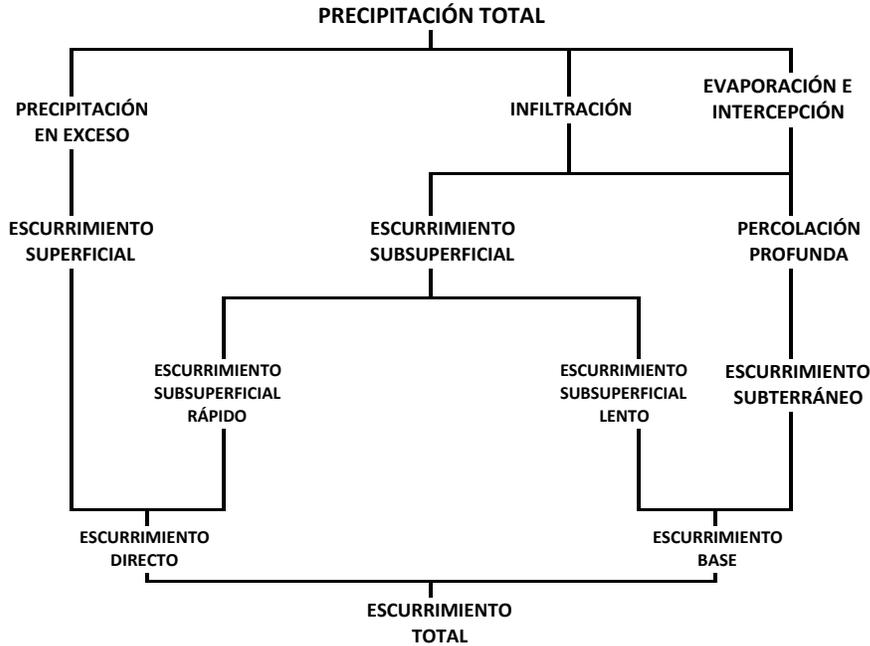


Figura 1-1. Relación lluvia-escorrimento.

El agua proveniente de la precipitación, se infiltra en las capas superiores del suelo saturándolo, posteriormente llena las depresiones del terreno y empieza a escurrir sobre la superficie, produciéndose así el *escurrimento superficial* (Oñate-Valdivieso, 2009). La cantidad de escurrimento superficial resultante de un evento de precipitación específico, puede determinarse haciendo uso de alguna relación lluvia-escorrimento. El método usado dependerá tanto de la disponibilidad de datos hidrométricos en el zona, como de las características de la obra a diseñar.

Ante la carencia de información hidrométrica, se han desarrollado distintos métodos que permiten, en función de la precipitación, obtener los caudales que pueden presentarse en la zona de estudio, siendo el método racional (1) uno de los más usuales. Este método que empezó a utilizarse desde mediados del siglo XIX, toma en cuenta, además del área de la cuenca, la intensidad de precipitación y es probablemente el más usado en hidrología para la estimación de caudales a partir de datos de precipitación, especialmente para el diseño de sistemas alcantarillado pluvial (Oñate-Valdivieso, 2009).

El método racional asume que el máximo porcentaje de escurrimiento de una cuenca pequeña, ocurre cuando la totalidad de dicha cuenca está contribuyendo al escurrimiento, y que tal porcentaje de escurrimiento es igual a un porcentaje de la intensidad de lluvia promedio (Colegio de Postgraduados, 2012). En una cuenca no impermeable, sólo una parte de la lluvia con intensidad i escurre directamente hasta la salida. Si se acepta que durante la lluvia, o al menos una vez que se ha establecido el gasto de equilibrio, no cambia la capacidad de infiltración en la cuenca, se puede escribir la siguiente ecuación (Aparicio, 2007):

$$Q = 0.278CiA \quad (1)$$

donde: Q = caudal (m^3/s)

C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

i = Intensidad de precipitación (mm/h)

A = Superficie de la cuenca (km^2)

Por su simplicidad, el método racional solamente puede servir para obtener una estimación del caudal en cuencas pequeñas y con precipitaciones cortas y homogéneas. En este método el tiempo no es considerado, se trata de un cálculo en régimen permanente que determina un caudal constante resultado de una precipitación también constante (Sánchez, 2012).

El coeficiente de escurrimiento (C), de la ecuación (1), es la variable menos precisa del método racional. Para Chow (1994) es la relación entre el escurrimiento directo y la intensidad promedio de la precipitación. Sin embargo, a causa de la variabilidad de la intensidad de precipitación, este valor es difícil de determinar utilizando la información observada, por lo que también puede definirse como la relación entre el volumen de escurrimiento directo y el volumen de precipitación en la cuenca, en un periodo de tiempo dado.

C toma valores entre 0 y 1 y varía considerablemente de una cuenca a otra y de una tormenta a otra debido a las condiciones de humedad iniciales. Sin embargo es común tomar valores representativos de acuerdo con ciertas características de la cuenca, como muestra la Tabla 1-2. La proporción de la lluvia total que alcanzará a escurrir superficialmente también dependerá del porcentaje de permeabilidad, de la pendiente y de las características del encharcamiento superficial. Superficies impermeables como pavimentos, o los techos de los edificios, producirán un escurrimiento de casi el cien por ciento después de que la superficie ha sido totalmente mojada, independiente de la pendiente (Oñate-Valdivieso, 2009).

Tabla 1-2. Valores representativos del coeficiente de escurrimiento.

Tipo de área drenada	Coeficiente de escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
ZONAS COMERCIALES:		
Zona comercial	0.7	0.95
Vecindarios	0.5	0.7
ZONAS RESIDENCIALES:		
Unifamiliares	0.3	0.5
Multifamiliares espaciados	0.4	0.6
Multifamiliares compactos	0.6	0.75
Semiurbanas	0.25	0.4
Casas habitación	0.5	0.7
ZONAS INDUSTRIALES:		
Espaciada	0.5	0.8
Compacta	0.6	0.9
CEMENTERIOS, PARQUES	0.1	0.25
CAMPOS DE JUEGO	0.2	0.35
PATIOS DE FERROCARRIL	0.2	0.4
ZONAS SUBURBANAS	0.1	0.3
CALLES:		
Asfaltadas	0.7	0.95
De concreto hidráulico	0.7	0.95
Adoquinadas	0.7	0.85
ESTACIONAMIENTOS	0.75	0.85
TECHADOS	0.75	0.95
PRADERAS:		
Suelos arenosos planos $S \leq 0.02$	0.05	0.1
Suelos arenosos con pendientes medias $0.02 < S < 0.07$	0.1	0.15
Suelos arenosos escarpados $S \geq 0.07$	0.15	0.2
Suelos arcillosos planos $S \leq 0.02$	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias $0.02 < S < 0.07$	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados $S \geq 0.07$	0.25	0.35

Fuente: Aparicio 2007

En consecuencia, el coeficiente de escurrimiento debe considerar, si la disponibilidad de información lo permite, el coeficiente de impermeabilidad que está relacionado con el tipo de superficie del área de drenaje, además de involucrar la pendiente promedio tal como muestra la ecuación (2).

$$C = 0.14 + 0.65 I + 0.05 S \quad (2)$$

donde: C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)
 I = Coeficiente de impermeabilidad (adimensional)
 S = Pendiente promedio (mm/mm)

El coeficiente de impermeabilidad (I) es función del tipo de suelo de la cuenca, del grado de impermeabilización de la zona y de todos aquellos factores que determina qué parte de la precipitación se convierte en escurrimiento superficial (EPM, 2009).

Tabla 1-3. Coeficiente de impermeabilidad.

Tipo de superficie	<i>I</i>
Cubiertas	0.90
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0.90
Vías adoquinadas	0.85
Zonas comerciales o industriales	0.90
Residencial con casas contiguas con predominio de zonas duras	0.75
Residencial multifamiliar con bloques contiguos	0.75
Residencial unifamiliar con casas contiguas y predominio de jardines	0.60
Residencial con casas rodeadas de jardines	0.45
Residencial con predominio de zonas verdes, parques y cementerios	0.30
Laderas sin vegetación	0.60
Laderas con vegetación	0.30
Parques recreacionales	0.30

Fuente: EPM 2009

Al analizar la ecuación (1) resulta evidente el impacto que el desarrollo urbano provoca sobre la relación lluvia escurrimiento al alterar la cobertura vegetal¹ y cubrir amplias extensiones de terreno con concreto y asfalto.

Con la impermeabilización del suelo mediante la construcción de calles, tejados, banquetas, patios, etc. El agua que originalmente era infiltrada, pasa a formar parte de los escurrimientos superficiales, además el volumen que escurría lentamente por la superficie del suelo y quedaba retenido por la vegetación, con la urbanización, pasa a escurrir en el sistema de drenaje, exigiendo mayor capacidad de las instalaciones sanitarias, siendo esta una de las principales causas de inundaciones urbanas.

1.3 Inundaciones urbanas

El CENAPRED (2009) define una inundación como el evento que debido a la precipitación, oleaje, o falla de alguna estructura hidráulica, provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay, provocando daños a la población, agricultura e infraestructura. Éste evento, a su vez, puede ser clasificado por su origen como pluviales, fluviales, costeras y por falla de infraestructura hidráulica y por el tiempo de respuesta de la cuenca como lentas o súbitas (CENAPRED, 2013).

¹ La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomasas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. También se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la acción humana como serían las áreas de cultivos.

Actualmente también es usual clasificar este evento por el sitio en donde se producen como rurales y urbanas. Los países definen lo que es un asentamiento urbano de formas muy distintas, lo que dificulta lograr una definición consistente de lo que es una inundación urbana. Sin embargo, existen diferencias reales entre las inundaciones rurales y urbanas. A pesar de que las primeras se extienden en territorios mucho más extensos, las inundaciones urbanas son mucho más costosas y difíciles de manejar (K. Jha, Bloch & Lamond, 2012).

Las inundaciones urbanas son el resultado de una combinación de factores que afectan la generación y el comportamiento de los escurrimientos superficiales y sus impactos son puntuales debido a la mayor concentración de habitantes e infraestructura. Los asentamientos urbanos también contienen la mayor parte de los activos económicos y sociales de los países, de tal manera que las inundaciones urbanas con frecuencia tienen consecuencias más serias para la sociedad. Además la concentración de población de bajos recursos en áreas suburbanas o periurbanas, que por lo general carecen de viviendas apropiadas así como de infraestructura y servicios, hace que los impactos sean más graves para los habitantes.

Las inundaciones son problemas globales que causan daños económicos y en el peor de los casos cobran vidas humanas. Hoy en día, son el desastre natural más frecuente en el mundo. El número reportado de inundaciones en ciudades se ha incrementado significativamente durante los últimos 20 años (Figura 1-2), del mismo modo, el número de personas afectadas y las pérdidas económicas también han aumentado (K. Jha, Bloch & Lamond, 2012).

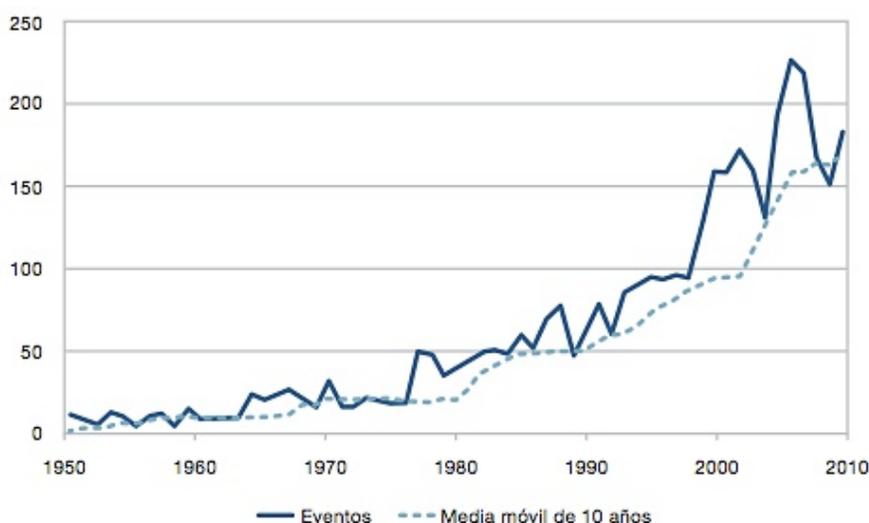


Figura 1-2. Número de inundaciones reportadas. Fuente: K. Jha, Bloch & Lamond 2012

1.3.1 Principales causas de las inundaciones urbanas

Si bien las causas de una inundación urbana son diversas, los principales factores que intervienen en la generación de este evento son:

- **Actividades humanas (urbanización):** las inundaciones causadas por la urbanización ocurren en el sistema de drenaje aumentando su frecuencia y magnitud debido al efecto de la impermeabilización del suelo, canalización y obstrucción de los escurrimientos (Tucci, 2006). La Figura 1-3 muestra los hidrogramas de entrada y salida de una cuenca no urbanizada en comparación con los hidrogramas correspondientes a una cuenca urbanizada.
- **Exceso de precipitación:** las precipitaciones intensas son eventos hidrometeorológicos extremos de gran intensidad, baja frecuencia y una distribución espacial aparentemente irregular, que provocan alteraciones naturales de tipo geomorfológico, como procesos de erosión superficial, movimientos de tierras e inundaciones (Sánchez, 2011).
- **Falla de infraestructura hidráulica:** al hablar de infraestructura hidráulica se incluye (Malinow, 2004) a las presas para propósitos múltiples, como puede ser: control de crecidas, abastecimiento de agua, riego, generación hidroeléctrica y turismo y recreación, que se emplazan en los valles de los ríos, así como a las canalizaciones, los terraplenes y sistemas de alcantarillado. Si bien las primeras pueden resultar de gran poder destructivo en caso de falla, las últimas, que mantienen el delicado equilibrio en el funcionamiento de los sistemas hidrológicos, también tienen el potencial de generar graves daños en caso de colapsar.

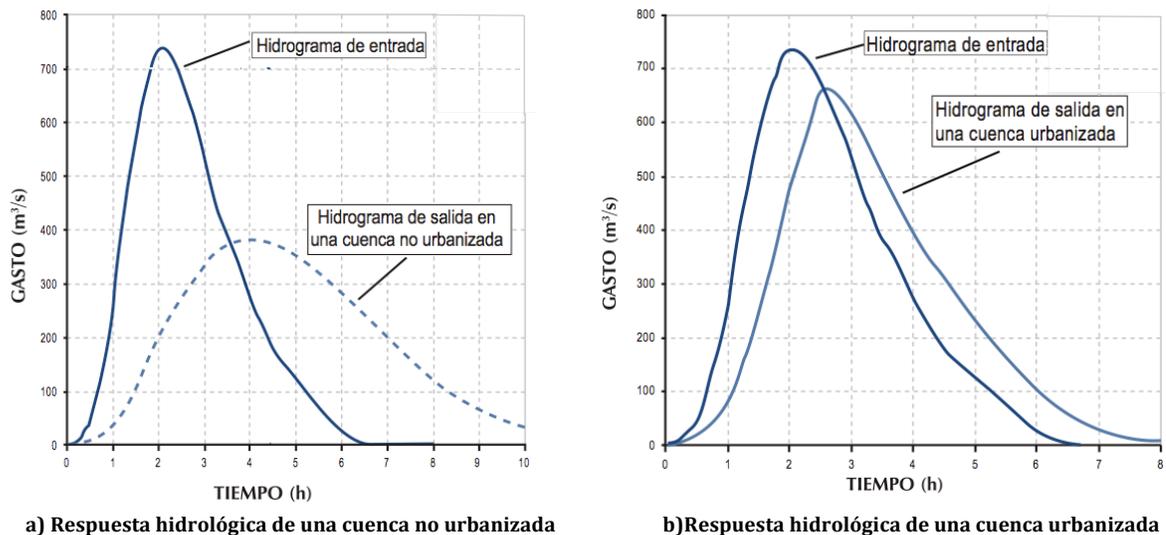


Figura 1-3. Hidrogramas de entrada v salida en cuencas con distinta respuesta hidrológica. Fuente: CENAPRED 2013

1.4 Contaminación difusa de origen urbano

La contaminación derivada de los escurrimientos superficiales constituye un gran inconveniente en las áreas urbanas ya que se ha demostrado que contiene los mismos tipos de contaminantes que se encuentran en las aguas residuales. La escorrentía urbana se considera como una fuente de contaminación de difícil localización (difusa) pues se origina en áreas extensas y su vertido es intermitente ligado a un fenómeno aleatorio, lo que la convierte en un tipo de contaminación difícil de monitorear, controlar o regular (Novotny, 1994 y Malgrat, 1995; citado en Zafra et al., 2009).

En las ciudades, el agua de lluvia se contamina al lavar la atmósfera, escurrir sobre superficies impermeables, arrastrar basura o erosionar suelos desprotegidos. La contaminación difusa de origen urbano está relacionada con el incremento del escurrimiento superficial en los núcleos poblacionales y con las pérdidas en los sistemas de alcantarillado. Las aguas de lluvia pueden ayudar como caudales de dilución en cuerpos contaminados y para otros usos humanos; sin embargo, generalmente no llegan con las condiciones fisicoquímicas óptimas debido a que durante el primer intervalo de tiempo en un evento de precipitación, el proceso de escurrimiento y el lavado atmosférico aportan contaminantes en cantidades significativas, fenómeno conocido como *first flush* o primer lavado (Fernández, Montt & Rivera, 2004 y Peña & Lara, 2012).

Las cargas de contaminantes son producto principalmente de la acumulación de sedimentos entre dos lluvias consecutivas, éstas cargas tienden a un umbral o valor máximo de equilibrio, como indica la Tabla 1-4 (Zafra et al., 2009). Sin embargo, en las ciudades densamente pobladas y poco planificadas del mundo, la contaminación difusa se produce también debido a la mezcla del agua de los desagües que transportan los escurrimientos urbanos con los sistemas de alcantarillado que transportan las aguas residuales domésticas (Sharma, 2008).

Tabla 1-4. Contaminación arrastrada por la lluvia dependiendo de las características de la zona.

Contaminantes	Zona residencial con densidad poblacional baja	Zona residencial con densidad poblacional alta	Comercial	Industrial baja	Carreteras y autopistas
Sólidos kg/km ² /año	10 - 180	30 - 210	13 - 180	80 - 290	13 - 1100
DBO mg/L	5200	3300	7100	2900	2300 - 10000
DQO mg/L	40000	42000	39000 - 62000	25000	53000 - 80000
NT mg/L	480	55 - 600	400	430	220 - 1000
Pb mg/L	1570	1900	2300	1600	450 - 2300
Cd mg/L	3.2	2.7	2.9	3.6	2.1 - 10.2
Coliformes fecales NMP/100 mL	60 - 82000	25 - 32000	36000	30000	19 - 30000

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno
 DBQ: Demanda química de oxígeno
 NT: Nitrógeno total

Pb: Plomo
 Cd: Cadmio

Fuente: Jiménez 2001

El alcance de la contaminación difusa se ve alterado por las condiciones climáticas, geográficas, geológicas y por el tipo de uso de suelo, así como por ciertas actividades como la deforestación, el drenaje de humedales y la impermeabilización de grandes zonas (Sharma, 2008). Además, con el aumento en el uso de productos químicos en general, el agua utilizada en las ciudades, industrias y en la agricultura vuelve a los cuerpos de agua receptores totalmente contaminada y en gran cantidad (Tucci, 2006).

Para algunos investigadores (Bravo et al., 2013) las prácticas de manejo sostenible desarrolladas en el pasado, pueden llegar a ser componentes clave para resolver los problemas de contaminación del agua y el suelo de un modo integrado y ecológicamente sustentable.

1.5 Escasez de agua potable en zonas urbanas

Disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano es una de las demandas básicas de la población ya que incide directamente en la salud y calidad de vida en general (CONAGUA, 2013). En el mundo, la cantidad de agua disponible no varía, sin embargo, el lugar, la forma y la calidad en que se encuentra sí presenta variaciones. A nivel local no se dispone de una cantidad fija. Hay promedios históricos, pero desgraciadamente ha disminuido el agua disponible tanto en cantidad como en calidad (CEMDA, 2006).

La disponibilidad de este recurso depende principalmente de la dinámica del ciclo hidrológico, de las condiciones climáticas y de la ubicación geográfica del asentamiento urbano, por lo que la escasez de agua es un fenómeno no solo natural sino también causado por la acción del hombre. En el planeta hay suficiente agua para abastecer a los 7,000 millones de personas que lo habitamos, pero ésta está distribuida de forma irregular, se desperdicia, está contaminada y se gestiona de forma insostenible (ONU-DAES & ONU-Agua, s.f).

Es pertinente distinguir entre escasez física y escasez económica del agua; la escasez física se define como la insuficiencia de recursos para satisfacer la demanda y esta ligada a las zonas áridas, por otro lado la escasez económica se refiere a la falta de inversión en infraestructura destinada a captar, transportar y distribuir el agua a la población de forma eficiente, siendo esta, junto con la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento, una de las principales causas de la falta de disponibilidad de agua en una ciudad.

El uso ineficiente del agua agrava la escasez y crea conflictos entre los diferentes grupos de usuarios. En el sector público urbano, el alto porcentaje de agua no contabilizada, que oscila entre 40 y 50% en las grandes ciudades, representa un desperdicio del recurso y merma la capacidad financiera de los organismos operadores (Breña, 2004).

Un indicador fundamental para evaluar la situación de los recursos hídricos de una cuenca es la disponibilidad natural media de agua por habitante en un año. Se considera que existe escasez extrema cuando la disponibilidad es menor a 1000 m³ por habitante (Tabla 1-5), cantidad que limita las posibilidades de desarrollar las actividades cotidianas. Las variables que intervienen en la determinación de este indicador son: el volumen precipitado sobre el área de la cuenca, la magnitud de la evaporación y la población que habita en su área de captación (Padrón & Cantú, 2009) por lo que resulta particularmente vulnerable ante los cambios demográficos drásticos.

Tabla 1-5. Clasificación de la disponibilidad de agua.

Volumen de agua (m³/hab/año)	Categoría de disponibilidad
< 1 000	Extremadamente baja
1 000 - 2 000	Muy baja
2 000 - 5 000	Baja
5 000 - 10 000	Media
10 000 - 20 000	Alta
> 20 000	Muy alta

Fuente: semarnat.gob.mx

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, actualmente 31 países padecen escasez y más de mil millones de personas carecen de agua potable. Se estima que para el año 2025, hasta dos terceras partes de la población mundial padecerán graves problemas de escasez mientras que la tercera parte restante se verá casi totalmente privada de este recurso (Aguirre, 2010). Frente a la creciente escasez de agua urbana, la mayor parte de las propuestas oficiales recurren a transferencias de agua entre cuencas y a la construcción de grandes obras de infraestructura como presa y acueductos, estrategias costosas que han ocasionado grandes daños ambientales (Barkin, 2009).

El enfoque sostenible de gestión de agua de lluvia supone que la captación y aprovechamiento de dicho recurso representa una opción real para abastecer, en cantidad, calidad y de manera constante a las personas que no cuentan con este vital líquido. Actualmente, el agua de lluvia es percibido como un recurso natural no aprovechable para consumo y uso doméstico, cuando en realidad representa una de las soluciones más viables y económicas para abastecer con agua a todos los seres vivos, sobre todo en aquellas regiones donde las fuentes superficiales de agua y los mantos acuíferos están contaminados y se encuentran sobreexplotados (Anaya, 2011).

1.6 Situación en México

Por razones históricas y políticas, México es un país centralizado. Como consecuencia, los servicios gubernamentales y el desarrollo industrial se han concentrado en la Ciudad de México, donde se localiza el 45% de la actividad industrial nacional, y junto con la zona conurbada, representa el 20% de la población del país, lo que la convierte en la zona urbana de mayor relevancia en el territorio nacional y una de las más grandes del mundo. La ciudad alberga casi todas las oficinas de gobierno, los centros de negocios nacionales e internacionales, las actividades culturales, las universidades y los centros de investigación de mayor relevancia. Adicionalmente, su ubicación a 2240 metros sobre el nivel del mar en una cuenca originalmente cerrada, la cual fue abierta artificialmente a finales del siglo XVII para evitar inundaciones, ha derivado en una creciente dificultad para satisfacer la demanda de agua potable de sus habitantes, así como para desalojar las aguas pluviales y evitar inundaciones (Gobierno del Distrito Federal et al., 2007 y Domínguez, 2011).

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México concentra una gran red de especialidades de todo tipo, lo que lo convierte en el organismo más complejo del país, y quizá, del mundo. Dicha complejidad se traduce en un sinnúmero de retos por resolver y en una agenda muy amplia de acciones y esfuerzos que aspiran a lograr una administración sustentable de los recursos hídricos (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2012).

Cabe resaltar que en México, tras la promulgación de la reforma constitucional en 1983, el servicio de agua potable, junto con los de drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales se encuentra a cargo de los gobiernos municipales, de los cuales hay cerca de 2,500 en el país. La mayor parte de estos organismos son pequeñas agencias, cuyo equipo es impuesto por las estructuras políticas a los funcionarios municipales, con poca experiencia administrativa y menos capacidad técnica (CONGUA, 2011 y Barkin, 2009).

A partir de la edificación de la gran Tenochtitlan, que se transformaría en lo que hoy en día se conoce como la zona metropolitana de la Ciudad de México, se ha trabajado constantemente por mantener los asentamientos existentes. Desde el origen del asentamiento urbano, esta región se ha caracterizado por el impacto de los escurrimientos pluviales, el hundimiento paulatino de la superficie de la ciudad y por la creciente escasez de agua debido al crecimiento poblacional en la zona (Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2012).

En cuanto al abastecimiento de agua y saneamiento, de acuerdo con el censo poblacional de 2010, la cobertura de agua potable, que incluye a las personas que tienen agua entubada dentro de la vivienda, fuera de la vivienda pero dentro del terreno, de la llave pública o bien de otra vivienda, fue de 91.6%, mientras que la cobertura de alcantarillado, que abarca a las personas que tienen conexión a la red de alcantarillado o a una fosa séptica, o bien a un desagüe, barranca, grieta, lago o mar, fue del 94.2% (CONAGUA, 2013 y Banco Mundial, 2013). Actualmente el sistema de drenaje para el manejo de las aguas urbanas que se encuentra en operación en la ciudad de México está compuesto como se indica en la Tabla 1-6.

Tabla 1-6. Resumen de la infraestructura de drenaje en operación en la Ciudad de México.

Longitud de la red primaria	2087 km
Longitud de la red secundaria	10237 km
Longitud de colectores marginales	144 km
Número de plantas de bombeo urbanas	87
Capacidad instalada de las plantas de bombeo	752 m ³ /s
Número de presas	21
Capacidad de almacenamiento de presas	3.10 hm ³
Longitud de cauces entubados	49 km
Número de lagunas y lagos de regulación	10
Capacidad de almacenamiento de lagunas y lagos	8.10 hm ³
Longitud total del drenaje profundo	165 km
Número de estaciones pluviográficas en tiempo real	78
Número de tanques de tormenta	10

Fuente: cuencavalledemexico.com

No obstante que las estadísticas muestran que la Ciudad de México cuenta con altas tasas de cobertura en los servicios de abastecimiento de agua potable y drenaje, una fracción importante de la población no recibe el servicio de manera adecuada, menos aun, de forma sostenible. Adicionalmente, al igual que sucede en el resto del mundo, las consecuencias del uso de este sistema de manejo de aguas urbanas ha tenido consecuencias significativas en el equilibrio hidrológico de la región.

En la actualidad ya se han presentado evidencias de que la capacidad de descarga del sistema general es insuficiente, muchos tramos del Sistema de Drenaje Profundo han trabajado a presión en varias ocasiones presentándose el caso de que el agua residual sube por las lumbreras y se derrame en las calles (Domínguez, 2000).



Figura 1-4. Inundación en la Ciudad de México. Fuente: sociedadtrespuntocero.com

En cuanto a la escasez, en términos absolutos el país no carece de agua, sin embargo, la desigualdad en la repartición de este recurso en el territorio, su contaminación y la falta de la infraestructura hidráulica adecuada son responsables de su insuficiencia (Rolland & Vega, 2010).



Figura 1-5. Escasez de agua en la Ciudad de México. Fuente: eluniversal.com.mx

CAPÍTULO 2

Enfoque alternativo para la gestión del agua de lluvia

Hoy en día, la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas, y a su vez, las poblaciones urbanas siguen creciendo rápidamente en muchas regiones del mundo, por lo que las estrategias de gestión integral de los recursos hídricos destinadas a mitigar las problemáticas relacionadas con el agua son vitales (WWAP, 2011).

El uso consciente del agua de lluvia, en el marco de la administración sostenible, representa una alternativa para disminuir los riesgos ante la situación descrita en el capítulo anterior. Para Pacheco (2008), la gestión integral del agua implica un cambio de comportamiento frente a los recursos naturales, identificar y analizar el valor de las prácticas ancestrales y entender el ciclo hidrológico en todas sus dimensiones para rediseñar el paradigma del consumo actual de agua en una ciudad.

Considerando las consecuencias del proceso de urbanización en el ciclo hidrológico, es evidente la necesidad de abandonar el modelo actual de gestión, y sustituirlo por otro que profundice más en la relación entre el ciclo del agua y la infraestructura urbana. Es decir, un sistema que desde la captación del agua hasta su devolución al medio natural, consiga que todos sus elementos funcionen complementariamente con el principal objetivo de conservar el equilibrio hidrológico de la zona, sistema que con la urbanización tradicional se ve drásticamente afectado (López de Asiain, Ehrenfried & Pérez del Real, 2007).

Este enfoque, que se basa en la captación de aguas pluviales, el consumo racional y el reúso del agua, requiere de diseños innovadores por parte de los profesionales, la creación de contextos institucionales y administrativos adecuados y de la participación plena y consciente de todos los actores involucrados, dando mayores responsabilidades a los usuarios. La gestión sostenible del agua, protege la calidad y la cantidad de ésta, ya que reduce el exceso de escurrimientos urbanos, contaminación, erosión e inundaciones, al mismo tiempo que proporciona abastecimiento a las comunidades.

2.1 Antecedentes de la gestión del agua de lluvia

El agua es esencial para la vida y las ciudades dependen de este recurso para su desarrollo. Antiguas ciudades se establecieron cerca de cursos de agua, y los ríos en particular, fueron los encargados del abastecimiento de agua, riego y el transporte de residuos. El crecimiento de las ciudades a lo largo del tiempo, especialmente después de la Revolución Industrial, sufrió una gran aceleración teniendo graves consecuencias, como problemas en la infraestructura, salud pública y degradación ambiental (Gomes & Moura, 2012).

En los últimos cien años el enfoque para orientar las soluciones técnicas a los problemas que generan las aguas de lluvia en una gran ciudad ha evolucionado al mismo tiempo que las áreas urbanas han concentrado una mayor cantidad de población y el modo de vida de los ciudadanos ha cambiado. A principios del siglo XX se consideraba que el agua de lluvia era indeseable en las ciudades y que los problemas que generaba eran independientes al proceso de urbanización. Las aguas de lluvia eran consideradas como las aguas servidas, de manera que la solución consistía en deshacerse de ellas rápidamente, colectándolas y evacuándolas fuera de la ciudad (Fernández, Montt & Rivera, 2004).

De este modo, con la finalidad de dar solución a las dificultades relacionadas con el agua en zonas urbanas, han surgido varios enfoques para mejorar el modo en que las ciudades administran sus recursos hídricos. El propósito general de dichos enfoques es manejar de manera integral los diferentes elementos del ciclo urbano del agua, lo que implica rediseñar el paisaje urbano y que la gestión del agua se realice en un circuito cerrado mediante la reutilización y el reciclado de recursos naturales, es decir, imitar a la naturaleza en la reproducción del ciclo hidrológico, dando lugar a la llamada Gestión Integral del Agua Urbana o GIAU (Banco Mundial, 2012).

La idea subyacente de la GIAU es manejar el sistema completo del recurso hídrico urbano como parte de una estructura coherente, siendo un proceso flexible, participativo e iterativo que integra los elementos del ciclo hidrológico, con el desarrollo urbano de la ciudad (Srinivas, 2009 y Banco Mundial, 2012). Las metas de la GIAU deben centrarse en proporcionar agua de buena calidad y en cantidad suficiente para abastecer el consumo humano y los distintos usos en las ciudades, atender la contaminación y los impactos adversos sobre el medio ambiente incluyendo las aguas subterráneas y cuerpos receptores, así como reducir el costo de los daños causados por las lluvias y otros fenómenos naturales y antrópicos relacionados con el agua. El proceso debe iniciar con políticas nacionales claras sobre la administración hídrica integral, respaldada por una legislación eficaz para orientar a los consejos locales. La GIAU comprende todos los aspectos de la gestión hídrica: ambiental, económico, social, técnico y político (Bahri, 2012). Para ello se requiere de una

adecuada planificación urbana, un marco institucional y legal adecuado y orientado a la administración sostenible, y de inversión en el desarrollo de infraestructura hidráulica acorde a las necesidades actuales del desarrollo urbano.

Las fases de la gestión integral del agua a través del tiempo, desde mediados del siglo XX cuando la necesidad de un cambio en el paradigma se hizo evidente, hasta la época actual han sido resumidas por Tucci (2006), quien distinguió tres etapas (Tabla 2-1). En la primera etapa, a la que llama *higienicista*, el concepto de agua urbana se limitaba al abastecimiento, es decir, a entregar agua a la población y retirar los desechos lo más lejos posible depositándolos prácticamente sin ningún tratamiento.

En este período la solución siempre fue recolectar el agua desde aguas arriba y depositarla aguas abajo, permitiendo a los excedentes pluviales escurrir libremente por las calles hacia los sistemas de drenaje. Este escenario fue aceptable mientras las ciudades tenían poblaciones relativamente pequeñas de hasta 20 mil habitantes. Durante la década de los setenta, los países desarrollados salieron de esta fase hacia una nueva, la denominada *correctiva*, que considera el tratamiento de las aguas residuales domésticas y el control de las inundaciones urbanas.

Por último, la tercera etapa, denominada *sostenible*, involucra la integración entre el proyecto urbanístico y las funciones de la infraestructura hidráulica dentro del ambiente, momento en que surgieron conceptos como BMP (Best Management Practice) en los Estados Unidos, WSUD (Water Sensitive Urban Design) en Australia o SUDS (Sustainable Drainage Systems) en el Reino Unido.

Tabla 2-1. Etapas de desarrollo de los sistemas de drenaje urbano en países de primer mundo.

Años	Período	Características
Hasta 1970	Higienicista	Abastecimiento de agua sin tratamiento de aguas residuales, transferencia hacia aguas abajo del escurrimiento pluvial por canalización.
1970 - 1990	Correctivo	Tratamiento de aguas residuales, amortiguamiento cuantitativo del drenaje y control del impacto existente de la calidad del agua pluvial.
1990 -	Sostenible	Planeamiento de la ocupación del espacio urbano obedeciendo a los mecanismos naturales del escurrimiento. Control de la contaminación difusa y gestión del escurrimiento pluvial a través de la recuperación de la infiltración.

Fuente: Adaptado de Tucci 2006

2.1.1 Registros históricos del uso del agua pluvial

En la actualidad, el ser humano obtiene el agua que necesita de fuentes secundarias, es decir, de ríos, lagos y acuíferos, que son alimentadas por una fuente primaria, la lluvia, recurso que perdió importancia a partir del rápido crecimiento de las ciudades, cuando los avances tecnológicos permitieron introducir el agua por medio de tuberías en los domicilios.

A través de los siglos se han utilizado diversas formas de aprovechamiento de agua de lluvia, pero éstas se han comenzado a estudiar y publicar técnica y científicamente sólo en épocas recientes (FAO, 2000). Muchas de estas obras históricas se originaron principalmente en Europa y Asia, y fueron empleadas desde que surgieron los primeros asentamientos humanos, algunos registros datan de hace más de 4,000 años en la antigua Mesopotamia. Estas prácticas ancestrales de uso del agua de lluvia están asociadas al conocimiento local del medio natural, a la periodicidad y volúmenes de precipitación durante las estaciones de lluvia, a la evaporación y temperaturas locales, así como al aprovechamiento de la topografía (Pacheco, 2008).

Las primeras referencias que se tienen de la cosecha del agua que cae, se remontan al desierto de Negev, en Israel y Jordania, donde se descubrieron sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia que datan de 2000 años a. C. Aunque se puede decir que fue Roma quien jugó el papel principal como agente de desarrollo en la antigüedad. Durante la época romana, avances significativos fueron introducidos en el diseño del drenaje urbano. Las preocupaciones sobre la mitigación de inundaciones urbanas y la necesidad de drenaje eran muy importantes para la ciudad. Sin embargo, la caída del imperio romano llevó a la pérdida de importancia en los sistemas de drenaje y durante la Edad Media la preocupación por el saneamiento disminuyó por lo que las calles se utilizaron indiscriminadamente como el único medio de evacuación de aguas residuales y de gestión de los escurrimientos pluviales (Ballén, Galarza & Ortiz, 2006 y Gomes & Moura, 2012).

En México, particularmente en la península de Yucatán, durante la época prehispánica, los Mayas y los Toltecas aprovecharon los cenotes y las cuevas de formación natural, como medio para captar y almacenar el agua de lluvia, utilizaron sistemas de almacenamiento como pozos, hondonadas y los denominados Chultunes, depósitos subterráneos en forma de botella compuesto de una cámara subterránea, con sus entradas recubiertas con yeso que dirigían el agua de lluvia hacia su interior durante las temporadas de mayor precipitación (Osornio, 2012 y Duran, 2010).

Siglos después el uso de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia decreció debido a la imposición de métodos y obras para la utilización del agua superficial y subterránea como son las presas, acueductos, pozos de extracción y sistemas de irrigación. En México se dejó de lado el aprovechamiento del agua pluvial debido a la conquista española en el siglo XVI; los españoles colonizaron los territorios introduciendo sistemas de agricultura y métodos de construcción europeos (Ballén, Galarza & Ortiz, 2006 y Duran, 2010).

La Revolución Industrial marcó un cambio profundo en la sociedad ligado al efecto de las transformaciones técnicas y económicas. Las consecuencias fueron fundamentales para las ciudades ya que el crecimiento urbano se produjo de forma rápida y desordenada. En este contexto, la falta de saneamiento se convirtió en un tema crítico para la vida urbana. De igual manera las inundaciones urbanas comenzaron a aumentar en magnitud y frecuencia, lo que agravó los problemas de saneamiento, extendiendo agua contaminada en grandes áreas.

Aproximadamente, al inicio de los años ochenta, el aprovechamiento de las aguas pluviales experimentó un renacimiento tecnológico significativo y aumentó el interés por parte de los consumidores y de la administración pública, siendo los principales motivos económicos y ambientales (Scheerer, 2011). Entre los beneficios del aprovechamiento del agua de lluvia se cuentan: es una fuente de agua localizada cerca del usuario, se reduce el costo y la necesidad de bombear agua del subsuelo, el agua de lluvia tiene un contenido bajo en minerales, es de relativamente alta calidad y, en su mayoría, los sistemas de aprovechamiento son fáciles de construir, operar y mantener. Además, la posibilidad de combinar medidas de control de inundaciones y de contaminantes con intervención en el paisaje, capaces de agregar valor a los espacios urbanos con múltiples funciones, se está convirtiendo en una opción interesante desde el punto de vista de la revitalización de las áreas degradadas, así como la optimización de los recursos disponibles y de las inversiones públicas.

Actualmente el enfoque tradicional para el diseño del sistema de drenaje en una ciudad está siendo complementado o sustituido por nuevos conceptos que buscan soluciones sistémicas, tratando de recuperar los patrones de flujo similares a los anteriores a la urbanización. Estos nuevos enfoques, ponen de relieve la necesidad de reducir los impactos sobre el ciclo urbano del agua, recuperando, tan cerca como sea posible, las funciones naturales (Gomes & Moura, 2012). Muchos países alrededor del mundo como Australia, Japón, Alemania, Brasil, Estados Unidos entre otros, han optado nuevamente por esta alternativa y disponen de normativas y legislación propias relativas a la captación y aprovechamiento del agua de lluvia.

2.1.2 Legislación

En los últimos veinte años más del 80% de los países del mundo han reformado sus leyes de aguas como respuesta a las crecientes presiones que ejercen el aumento de la población, la urbanización y el cambio climático sobre los recursos hídricos. En muchos casos, tales reformas han tenido impactos positivos sobre el desarrollo, como las mejoras en el acceso al agua potable y saneamiento (CINU, 2012).

La Agenda Local 21², firmada en Rio de Janeiro, configura el marco en el cual debe conformarse a nivel local el desarrollo sostenible de los países. La Carta Europea de Ciudades Sostenibles es la implementación para Europa de los acuerdos de la Agenda Local 21. En ella, ciudades de más de 80 países se comprometen a intervenir en sus políticas locales para conseguir el desarrollo sostenible, e intercambiar experiencias que favorezcan este fin.

No obstante, la adaptación del desarrollo sostenible a la realidad jurídica de los diferentes países del mundo no ha estado exenta de dificultades, pues obligaba a traducir el concepto de sostenibilidad en algo palpable o mensurable. Principalmente cuando según La Agenda Local 21, el desarrollo sostenible no es tanto una meta, si no un camino a seguir. En este sentido, diferentes organismos e instituciones, públicas y privadas, nacionales e internacionales, se dispusieron a valorar mediante indicadores el camino seguido hacia la sostenibilidad (Pere & Peña del Valle, 2008).

Durante muchos años la legislación en materia de drenaje urbano en países como Estados Unidos, se enfocó únicamente en el problema de las inundaciones. Fue en la década de los 70's cuando la contaminación difusa se reconoció como un problema que derivó en programas específicos para resolver dicha situación (Perales, Andrés-Doménech & Fernández, 2008). Del mismo modo, en Europa la administración de los escurrimientos urbanos se centró por mucho tiempo en el control de las inundaciones locales, y no fue sino hasta hace aproximadamente dos décadas cuando se comenzó a tomar conciencia del problema de la contaminación de las aguas urbanas. A partir de entonces, comenzaron a adaptarse criterios combinados de cantidad y calidad, intentando maximizar la integración paisajística y el valor social (Perales & Andrés-Doménech, 2007).

En México el concepto de desarrollo sostenible y el de sostenibilidad fueron incorporados en 1996 en la reforma a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de Diciembre de 1987. Ésta, que puede considerarse la primera ley ambiental de México como tal, a pesar de que previamente se había aprobado una legislación al respecto, representó una profunda modificación a la forma de concebir los

² La Agenda Local 21 es un plan de acción no vinculante de las Naciones Unidas en relación con el desarrollo sostenible, producto de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), celebrada Brasil en 1992.

temas ambientales desde el punto de vista gubernamental que afectó, en primer lugar, la concepción tradicional de lo que debía ser una secretaría del medio ambiente; pero también la relación de ésta con las otras secretarías, y, a su vez, con el concepto de medio ambiente (Pere & Peña del Valle, 2008).

A partir de 1982, la política ambiental mexicana comenzó a adquirir un enfoque integral y se reformó la Constitución para crear nuevas instituciones y precisar las bases jurídicas y administrativas de la política de protección ambiental. En este año fue creada la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), para garantizar el cumplimiento de las Leyes y reorientar la política ambiental del país y en este mismo año se promulgó la Ley Federal de Protección al Ambiente. Una década después la SEDUE se transformó en la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y se crearon el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) (SEMARNAT, 2013).

En materia de agua, el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, determina que la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio corresponden a la nación. La Ley de Aguas Nacionales, reglamentaria del artículo 27, tiene como objetivo regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral y sustentable (León, 2008). La legislación nacional incluye a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General de Asentamientos Humanos, la Ley General de Bienes Nacionales y la Ley de Suelos.

2.2 Urbanización de bajo impacto

La sustentabilidad a la que se refiere la Ley de Aguas Nacionales, tiene que ver con el conocimiento del ciclo hidrológico, con la planeación y desarrollo de acuerdo a la disponibilidad de agua. Se trata de lograr el equilibrio de los recursos hidrológicos de una cuenca considerando el escurrimiento natural y el crecimiento urbano conservando la cantidad y calidad del agua. Sin embargo esto no sucede en los centros urbanos donde la extracción de aguas subterráneas es superior a la infiltración, no hay captación de escurrimientos y en general el saneamiento es, en el mejor de los casos, ineficiente.

El propósito de la urbanización de bajo impacto es generar un entorno urbano que no atente contra el medio ambiente, que sea funcional y que proporcione valor urbanístico a la eficiencia energética y del agua. Para lograrlo es necesario re moldear las ciudades con una planificación adecuada haciendo uso de tecnologías innovadoras, adicionalmente, se requiere que las decisiones de las administraciones locales se tomen de manera concertada,

que se fomente una estrecha colaboración entre los diferentes niveles de gobierno y que se definan procedimientos claros de actuación.

Para que el crecimiento urbano no suponga un obstáculo infranqueable para el ciclo hidrológico, es fundamental por un lado, mantener en la medida de lo posible el recorrido natural del agua de lluvia y por otro, recoger en las zonas impermeabilizadas el agua tan rápido como sea posible para su almacenamiento en depósitos y su posterior reutilización evitando el arrastre de sustancias nocivas (López de Asiain, Ehrenfried & Pérez del Real, 2007).

Este enfoque reconoce que es el proceso de urbanización el que genera los problemas relacionados con el agua de lluvia, y es necesario por lo tanto controlar el volumen, los caudales máximos y la contaminación en la fuente, minimizando el cambio hidrológico y las repercusiones negativas del proceso de urbanización. En este esquema las áreas verdes juegan un papel fundamental; desde el punto de vista hidrológico se trata de minimizar los escurrimientos al favorecer la infiltración y el almacenamiento, mantener y potenciar la red de drenaje natural mediante la conservación de causes y humedales, minimizar la contaminación del escurrimiento superficial y favorecer la captación con la finalidad de disminuir el impacto sobre los cueros receptores (Fernández, Montt & Rivera, 2004).

Como primer punto para un funcionamiento coherente con el resto del sistema, el modelo propone que la edificación asuma la impermeabilización que ella misma le impone al terreno y, la mitigue desde su propia cubierta, convirtiéndola en captadora de agua pluvial que, disponible para un posterior uso, alivie la demanda de los usuarios (López de Asiain, Ehrenfried & Pérez del Real, 2007). La recolección del agua de escorrentía superficial o de los techos de las viviendas puede ser una manera de incrementar el suministro local de agua y recargar las reservas de aguas subterráneas, mitigando simultáneamente los problemas de inundaciones en algunas áreas. Estas medidas podrían ser una solución inmediata para acompañar las mejoras a largo plazo de la infraestructura para el suministro de agua y los sistemas de drenaje (Global Water Partnership, 2011).

Esto se logra integrando funciones hidrológicas usando cuatro principios de manejo. El primero pretende minimizar los impactos adversos al reducir la impermeabilidad y mantener los drenajes naturales. El segundo, provee un sistema de retención temporal de escurrimientos, dispuestos eficientemente en la zona de desarrollo. El tercer principio radica en mantener y en lo posible, aumentar el tiempo de concentración de la cuenca en estado natural. Por último, el cuarto principio requiere la aplicación de un programa de educación efectivo como medida de prevención de riesgos ambientales (Burgos, 2007).

Adicionalmente, algunos de los principios de la urbanización de bajo impacto relativos al agua son:

- Posibilitar el regreso del agua de lluvia al medio natural directamente conservando en la medida de lo posible los drenajes naturales.
- Proporcionar suficientes superficies permeables durante el proceso de urbanización.
- Proveer instalaciones que faciliten el ahorro de agua y la reutilización en cada hogar, edificio o construcción.
- Reutilizar el agua mediante procesos de tratamiento que permitan su incorporación al ciclo hidrológico.
- Transformar cada espacio urbano en una unidad que permita el aprovechamiento de recursos.

2.3 Ciclo hidrológico urbano

A lo largo de la historia el desarrollo urbano de las sociedades ha ido acompañado de un incremento en la demanda de agua, lo que ha provocado un aumento progresivo de la presión sobre los recursos hídricos que, durante el último siglo, ha llegado a un punto de insostenibilidad por la falta de equilibrio entre la utilización del recurso natural y su capacidad de regeneración (López de Asiain, Ehrenfried & Pérez del Real, 2007).

Frente a la escasez, sobreexplotación y contaminación del agua a nivel mundial, la única forma de abordar la situación es remitirnos al ciclo hidrológico y entender su funcionamiento para tratar de evitar que la intervención del hombre en el mismo, desde que desvía el agua hasta que la devuelve, lo desestabilice acabando con todos los ecosistemas que dependen de él (López de Asiain, Ehrenfried & Pérez del Real, 2007).

El concepto tradicional de ciclo urbano del agua, a pesar de su nombre, es de características lineales. Los procesos sucesivos responden a una secuencia de flujo lineal: captación, distribución, uso/consumo, saneamiento, depuración y vertido al medio receptor. Por lo tanto, los actuales sistemas de aguas urbanas son, en gran medida, el reflejo de un modelo de gestión lineal, no integral, ante un desarrollo urbano que no siempre ha sido sensible al carácter cíclico del recurso hídrico, especialmente en el ámbito urbano (Álvarez et al., 2014).

Adicionalmente a las etapas convencionales del ciclo hidrológico, debe incluirse una fase que contemple el paso del agua a través de la infraestructura hidráulica; en el ciclo hidrológico urbano (Figura 2-1), el agua, antes de llegar al suelo purifica el aire recogiendo

partículas contaminantes que arrastrará posteriormente. Generalmente en una ciudad no hay una cúpula vegetal de intercepción, sino suelos y techados impermeables, por lo que se produce menos infiltración y el agua corre rápidamente por canales y pavimentos, concentrándose en un corto periodo de tiempo en los sistemas de alcantarillado (García, 2011).

El modelo del ciclo hidrológico urbano supone un sistema global que contemple el manejo del agua tanto a nivel urbano como edificatorio procurando maximizar la vida útil mediante la captación, el ahorro y reúso de dicho recurso para cubrir las necesidades propias, minimizando el consumo y evitando la sobreexplotación, lo que reduce considerablemente la carga de aguas residuales a las que actualmente se enfrentan los sistemas de tratamiento.



Figura 2-1. Modelo del ciclo del agua urbana. Fuente: Bahri 2012

CAPÍTULO 3

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS

Se considera que la gestión convencional de los recursos hídricos en zonas urbanas no ha tenido la capacidad para enfrentar los retos clave de las ciudades en crecimiento, por ejemplo la contaminación de los recursos hídricos, la creciente competencia por el agua, el manejo de aguas residuales y el saneamiento. En general, la administración del suministro de agua, del saneamiento y de las aguas pluviales no se ha realizado de manera coordinada; en lugar de ello, cada uno de estos subsistemas se ha planificado y llevado a cabo como un servicio aislado, consecuentemente las relaciones entre los problemas y las posibles soluciones han sido ignoradas (Global Water Partnership, 2011).

La gestión de las aguas pluviales urbanas se ha vuelto cada vez más compleja en las últimas décadas. En consecuencia, la terminología que describe los principios y prácticas de drenaje urbano se ha vuelto también cada vez más diversa, lo que aumenta el potencial para la confusión y la falta de comunicación (Fletcher et al., 2014). La terminología varía de un lugar a otro, pero la filosofía de diseño es similar. En Europa, y principalmente en el Reino Unido, los SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) son utilizados con su objetivo principal en el mantenimiento de la salud pública, la protección de los recursos hídricos y la preservación de la diversidad biológica y los recursos naturales para las necesidades futuras.

Por otro lado, en Australia, el concepto WSUD (Water Sensitive Urban Design) fue propuesto como un enfoque de captación de los cuales los SUDS son una parte y se refiere a un enfoque de ingeniería destinada a integrar de forma sostenible el manejo del agua urbana en el paisaje de la ciudad, reducir al mínimo la degradación ambiental y lograr armonía entre el agua y el ambiente urbano (Zhou, 2014), mientras que en los Estados Unidos y Canadá, el término LID (Low Impact Development) describe un enfoque que fomenta la interacción de los procesos naturales con el entorno urbano para preservar y recrear los ecosistemas para la gestión del agua. La urbanización de bajo impacto LID pone énfasis en la conservación y el uso de elementos naturales en combinación con controles hidrológicos a pequeña escala para mitigar los impactos adversos de la urbanización.

Los términos SUDS, WSUD y LID, son los más comunes encontrados en la literatura, sin embargo actualmente, tal y como mencionan algunos autores (Rodríguez et al., 2008), pueden encontrarse adicionalmente las siguientes denominaciones: BPAs (Buenas Prácticas Ambientales), TEDUS (Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible) y BMPs (Best Management Practices).

La terminología evoluciona a nivel local y por lo tanto tiene un papel importante en el establecimiento de la conciencia y la credibilidad de los nuevos enfoques (Fletcher et al., 2014). Si bien el término SUDS para referirse a los *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible* no es aún de uso generalizado, ha sido acuñado por algunas instituciones por ser siglas comunes a la definición empleada en el Reino Unido. De la misma manera en este trabajo se emplean estas siglas para referirse a la amplia gama de soluciones técnicas que permiten la gestión sostenible del agua de lluvia.

3.1 Filosofía de los SUDS

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible, en adelante SUDS, representan una alternativa en cuanto a planificación, diseño, construcción y operación de infraestructura hidráulica destinada a la gestión del agua de lluvia, que forman parte de una nueva concepción del urbanismo que aplica los principios del desarrollo sostenible al diseño urbano, y cuya filosofía, en comparación con las estrategias tradicionales, consiste en considerar el agua de lluvia como un recurso de gran valor (García, 2011).

La administración sostenible del agua urbana es compleja y requiere, no solo de infraestructura de abastecimiento y de tratamiento de aguas residuales, sino también del control de la contaminación y de la prevención de inundaciones. Del mismo modo, se requiere de coordinación entre las diferentes autoridades locales que conduzcan a un uso racional y equitativo de los recursos hídricos urbanos (ONU, 2010).

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible, están diseñados para gestionar los posibles riesgos derivados de los escurrimientos urbanos y contribuir en lo posible en la mejora del medio ambiente. Por lo tanto, el propósito de los SUDS es minimizar los impactos del cambio en la cantidad y calidad de la escorrentía y maximizar la integración del entorno en su ejecución (Woods-Ballard et al., 2007). El paradigma de soluciones SUDS debe ser la de un sistema fácil de operar, lo que implica un consumo mínimo o nulo de energía. Valls y Perales (2008) los definen como elementos integrantes de la infraestructura hidráulica urbana, preferiblemente vegetados, y destinados a filtrar, retener, infiltrar, transportar y almacenar agua de lluvia, de forma que ésta no sufra ningún deterioro o incluso permita la eliminación, de forma natural, de parte de la carga contaminante que haya podido adquirir previamente.

De acuerdo con Perales (2008) algunos objetivos adicionales incluyen:

- Preservar la calidad de los cuerpos de agua receptores de los escurrimientos urbanos,
- Respetar el régimen hidrológico natural de las cuencas, reduciendo volúmenes de escurrimiento y gastos máximos procedentes de zonas urbanizadas, con la ayuda de elementos de retención en el origen y minimizando áreas impermeables,
- Integrar la gestión y tratamiento de las aguas de lluvia en el paisaje, minimizando el costo de la infraestructura de drenaje al mismo tiempo que aumenta el valor del entorno y,
- Reducir la demanda de agua potable, realizando una gestión integral de los recursos hídricos al fomentar la reuso en origen tanto de aguas de lluvia como grises.

Los SUDS como parte de las estrategias destinadas a la mejor administración de los recursos hídricos urbanos, pretenden replicar los sistemas naturales mediante soluciones rentables y de bajo impacto ambiental para drenar los escurrimientos superficiales por medio de su captación, almacenamiento y tratamiento antes de permitir que se libere en los cuerpos de agua receptores, con el objetivo de contrarrestar los efectos de los sistemas de drenaje convencionales que a menudo permiten inundaciones, la contaminación del medio ambiente y de las fuentes de agua subterránea utilizadas para el abastecimiento de agua potable. Los sistemas de drenaje sostenible deben apuntar hacia el mantenimiento o la restauración de un régimen hidrológico natural, de tal manera que el impacto de la urbanización sobre las inundaciones aguas abajo y la calidad del agua se reduzca al mínimo.

Los SUDS están concebidos para sustituir a los colectores subterráneos convencionales, o en su caso utilizarse en combinación con ellos, sin que ello vaya en detrimento del nivel de seguridad frente a inundaciones exigible a la infraestructura de drenaje pluvial de una ciudad (Perales, 2008). Originalmente, los SUDS se introdujeron principalmente como instalaciones de propósito único, sin embargo esto ahora ha evolucionado hacia sistemas mas integrales, que pueden ser diseñados para satisfacer una variedad de objetivos dependiendo de las necesidades y limitaciones del sitio en donde pretendan implementarse. Su uso es evidente para los nuevos desarrollos urbanos, pero no debe descartarse en zonas ya consolidadas, en donde acciones puntuales pueden traer consigo grandes beneficios (Febles, Perales & Soto, 2009).

3.1.1 Enfoque de sostenibilidad en los SUDS

El concepto de sostenibilidad se refiere a la cualidad de un elemento, sistema o proceso de permanecer en el tiempo por sus propias características. El informe Brundtland de 1987 de la ONU define el desarrollo sostenible como aquel que cubre las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de generaciones futuras de cubrir sus necesidades.

El desarrollo sostenible representa un cambio de paradigma en la administración de los recursos. De esta manera, la sostenibilidad del agua pasa por la conservación de sus fuentes, la lluvia, acuíferos y ríos, los bosques, la energía para manejarla, la agricultura, la ganadería y por la urbanización y la industria (Monroy, 2013). La sensibilidad hacia la sostenibilidad urbana busca que el consumidor de agua cuestione de dónde proviene, cómo se trata en la fuente, cómo se distribuye y cuál es su destino final (Pacheco, 2008).

La administración sostenible de las aguas de lluvia se fundamenta en tres pilares: la laminación de la cantidad de agua, la mejora de su calidad mediante procesos naturales de eliminación de contaminantes, y el servicio al ciudadano con la mejora del paisaje y la recuperación del hábitat natural dentro de las ciudades (Fernández et al., 2003, citado en Castro et al., 2005).

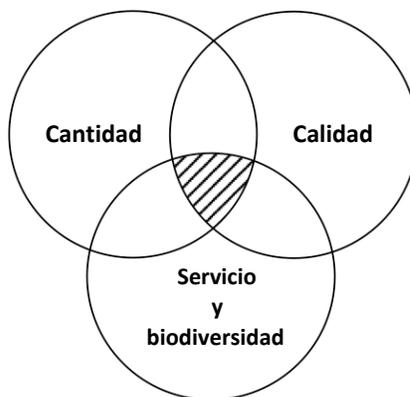


Figura 3-1. Enfoque de sostenibilidad SUDS
Fuente: Adaptado de Woods-Ballard et al. 2007

Con base en lo anterior, los SUDS deben minimizar los impactos de los escurrimientos urbanos mediante su captura tan cerca de la fuente como sea posible para luego ser liberados lentamente en los cuerpos receptores. El uso de SUDS para controlar el escurrimiento también proporciona el beneficio adicional de reducir los contaminantes en el agua por la sedimentación de sólidos en suspensión, y en algunos casos, proporcionando tratamiento biológico.

3.2 Clasificación

Son numerosos los criterios de clasificación encontrados en la literatura que se pueden emplear para catalogar los distintos sistemas urbanos de drenaje sostenible no existiendo un consenso universal (Jiménez, 1999; citado en Castro et al., 2005). A continuación se presentan algunas de las clasificaciones más comunes en función de la zona geográfica de su aplicación.

En Chile, por ejemplo, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo ha clasificado las llamadas Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias Urbanas, basándose en los procesos de infiltración, almacenamiento o ambos (MINVU, 1996), de acuerdo con la Figura 3-2:

Ministerio de Vivienda y Urbanismo	Obras de infiltración	Estanques de infiltración Pozos y zanjas de infiltración Superficies permeables
	Obras de almacenamiento	Estanques de retención Humedales artificiales
	Obras anexas	Franjas filtrantes Zanjas con vegetación Canales para drenaje Caídas y disipadores de energía Sedimentadores

Figura 3-2. Clasificación MINVU. Fuente: Elaboración propia.

A su vez, en España, el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria (Rodríguez et al., 2008), propone la siguiente clasificación (Figura 3-3):

GITECO	Medidas preventivas	Legislación Formación Inversión
	Sistemas de infiltración	Superficies permeables Pozos y zanjas de infiltración Depósitos de infiltración
	Sistemas de captación y transporte	Drenes filtrantes Cunetas verdes Franjas filtrantes
	Sistemas de almacenamiento	Depósitos de detención Estanques de retención Humedales artificiales

Figura 3-3. Clasificación GITECO. Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera, en el Reino Unido, los SUDS son catalogados de acuerdo con el siguiente modelo (García, 2011):

Environmental Alliance	Técnicas de control en origen	Pavimentos porosos Zanjas de infiltración Depósitos de infiltración Cubiertas vegetadas
	Sistemas de conducción permeable	Drenes filtrantes Cunetas verdes
	Sistemas de tratamiento pasivo	Franjas filtrantes Depósitos de detención Estanques de retención Humedales artificiales

Figura 3-4. Clasificación CIRIA. Fuente: Elaboración propia.

Con base en lo anterior se presenta la siguiente clasificación que rescata los aspectos comunes a las clasificaciones presentadas anteriormente:

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)	Medidas no estructurales	Legislación Formación Inversión	
	Medidas estructurales	Sistemas de infiltración	Superficies permeables Pozos y zanjas de infiltración Depósitos de infiltración
		Sistemas de captación y transporte	Drenes filtrantes Cunetas verdes Franjas filtrantes Cubiertas vegetadas
		Sistemas de almacenamiento	Depósitos de detención Estanques de retención Humedales artificiales

Figura 3-5. Clasificación SUDS propuesta. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales o preventivas se refieren a una serie de actividades que tienen como finalidad concientizar a la población acerca de su papel en la administración del agua y como parte del proceso de mantenimiento de la infraestructura. Estas medidas pueden ser muy eficaces en el control de la generación de contaminación, al disminuir las fuentes potenciales de contaminantes, lo que a su vez puede reducir o eliminar la necesidad de un tratamiento costoso posterior. De modo que las medidas no estructurales o preventivas pueden agruparse en: Legislación, educación e inversión (EPA, 1999 y Febles, Perales & Soto, 2009).

- Legislación: El cumplimiento de la legislación ambiental pertinente es una consideración esencial para todos los sistemas de drenaje, incluyendo a los SUDS. El regulador ambiental debe controlar la contaminación del agua mediante la emisión de autorizaciones, permisos o consentimientos, y cualquier descarga de contaminantes debe ser autorizado por adelantado.

Para alcanzar la consolidación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible en las ciudades, es necesario desarrollar políticas públicas que integren aspectos ambientales y de gestión hídrica en la legislación urbanística (García, 2011). Una legislación que fomente la sostenibilidad del agua debe incluir:

- Regulación
- Control preventivo
- Sanciones
- Información
- Planeamiento urbanístico

- Educación: La educación es esencial para el desarrollo sostenible. Los ciudadanos del mundo deben encontrar el camino hacia la sostenibilidad y la base del conocimiento actual no contiene las soluciones a los problemas ambientales, sociales y económicos contemporáneos. Por lo que la educación es crucial para que los profesionales y ciudadanos en general tomen conciencia de las problemáticas y las posibles soluciones orientadas hacia un mejor futuro (UNESCO, 2009).

La educación para el desarrollo sostenible no debe ser un programa o proyecto en particular, sino más bien un paradigma que involucre todos los componentes de la educación, es decir, legislación, política, finanzas, planes de estudio, aprendizaje, evaluación, etc. La educación puede ser un medio eficaz para reducir la cantidad de contaminantes de fuentes no puntuales que llegan a los cuerpos receptores. Los usuarios no suelen ser conscientes de que los efectos combinados de sus acciones pueden tener graves consecuencias en la calidad del agua (UNESCO, 2009 y EPA, 1999).

- Inversión: Si se desea alcanzar un desarrollo sostenible, no sólo se deben elevar las inversiones destinadas a este propósito, sino también emplearlas más eficazmente. Sin un adecuado nivel de inversión económica por parte de las administraciones públicas no es posible afrontar la elaboración de manuales de diseño y construcción, y programas de seguimiento de los sistemas de drenaje urbano.

3.2.2 Medidas estructurales

Se consideran medidas estructurales la amplia variedad de sistemas diseñados para proporcionar control en la cantidad y calidad de los escurrimientos pluviales mediante acciones que contengan, en mayor o menor grado, algún elemento constructivo. Las medidas estructurales se agrupan de acuerdo con la clasificación presentada, como sistemas de infiltración, sistemas de captación y transporte, y sistemas de almacenamiento.

Sistemas de Infiltración

Los sistemas de infiltración están diseñados para capturar un volumen de escurrimiento de aguas pluviales, retenerlo e infiltrarlo en el suelo. Este proceso puede tardar varias horas o incluso días para que la escorrentía no se infiltre en el terreno con demasiada velocidad.

No obstante sus beneficios, la infiltración del agua de lluvia tiene también algunos inconvenientes. De acuerdo con la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA, 1999), los beneficios de la infiltración incluyen el control de la cantidad y la calidad del agua. El control de la cantidad se produce mediante la detención del escurrimiento superficial y su infiltración en el suelo subyacente, reduciendo el volumen de agua que se descarga a las fuentes que la reciben, lo que mitiga algunos de los posibles impactos causados por un exceso de escurrimiento, mientras que el control de la calidad ocurre al filtrar al agua a través de las capas del suelo reduciendo la concentración de contaminantes en la fuente receptora (García, 2011). Adicionalmente, la infiltración puede tener beneficios secundarios, como el aumento de la recarga de los acuíferos.

Por otro lado, los procesos de infiltración pueden no ser adecuados en áreas donde el agua subterránea es una fuente primaria de abastecimiento de agua potable debido a la posibilidad de migración de contaminantes. Esto es especialmente cierto si el escurrimiento es de un área comercial o industrial, donde está presente la posibilidad de contaminación por compuestos orgánicos o metales. Además, el rendimiento de la infiltración de los SUDS se limita en zonas con suelos permeables y pueden experimentar disminución de la capacidad de infiltración e incluso obstrucción debido a la acumulación excesiva de sedimentos, por lo que un mantenimiento frecuente puede ser necesario para restaurar la capacidad de infiltración del sistema. También se debe tener cuidado durante la construcción para limitar la compactación de las capas de suelo, ya que una compactación excesiva puede ocasionar una reducción en la capacidad de infiltración.

De acuerdo con la clasificación propuesta (Figura 3-5), los sistemas de infiltración pueden agruparse como superficies permeables, pozos y zanjas de infiltración y depósitos de infiltración, como se describe enseguida.

- Superficies permeables (Pervious Surface): Los pavimentos permeables proporcionan una superficie adecuada para peatones y / o vehículos, permitiendo al mismo tiempo que el agua de lluvia se infiltre a través de la superficie y en las capas subyacentes. Estos sistemas están constituidos por un volumen de material permeable situado bajo una superficie que permite el paso del agua pudiendo tratarse de: césped, grava, o las distintas variedades de pavimentos permeables (CIRIA, 2001; citado en Castro et al., 2005). El agua puede entonces ser almacenada temporalmente antes de la infiltración en el suelo, reutilizada, o descargada a un curso de agua u otro sistema de drenaje.

Woods-Ballard et al. (2007), clasifica las superficies permeables en los siguientes grupos:

- Pavimentos porosos: Son aquellos que permiten la infiltración del agua a través de la totalidad de su superficie.
- Pavimentos permeables: Están formados por materiales considerados como impermeables que proporcionan espacio vacío combinado con materiales permeables, de modo que el agua percola por las discontinuidades y a través de los materiales permeables hacia las capas inferiores del pavimento.



Figura 3-6. Pavimento poroso (derecha) y pavimento permeable (Izquierda). Fuente: boletin-iccy.com y hidrocreto.com

Las superficies permeables, junto con sus estructuras asociadas, interceptan los escurrimientos superficiales y proporcionan un medio de tratamiento de contaminantes antes de su descarga en los cuerpos receptores. Los procesos de tratamiento que se producen dentro de la estructura de la superficie, la matriz subsuperficial que comprende las capas de suelo donde se permite la infiltración, y las capas de geotextil incluyen:

- Filtración
 - Adsorción
 - Biodegradación
 - Sedimentación
-
- Pozos y zanjas de infiltración (Infiltration Devices): Los pozos y zanjas son excavaciones poco profundas (1 a 3 m) llenas de material granular (natural o sintético) que tienen la finalidad de almacenar el agua procedente de los escurrimientos hasta que se produce la infiltración en el terreno natural. Las zanjas son más estrechas y menos profundas que los pozos, siendo más eficientes desde el punto de vista constructivo. Normalmente los pozos y zanjas de infiltración sólo pueden captar una pequeña cantidad de la escorrentía y, por lo tanto, pueden ser diseñados para capturar la primera oleada de un evento de escurrimiento infiltrando el agua en los suelos circundantes desde el fondo y a los lados del dispositivo. Por esta razón, los pozos y zanjas de infiltración son utilizadas con frecuencia en combinación con otros SUDS tales como una cuenca de detención para controlar los flujos pico (Perales & Andrés-Doménech, 2007 y Castro et al., 2005).

Los pozos y zanjas de infiltración pueden ser utilizados para eliminar los sólidos en suspensión, partículas, bacterias, compuestos orgánicos, metales solubles y nutrientes a través de los mecanismos de filtración, adsorción y descomposición microbiana. También son útiles para proporcionar la recarga de las aguas subterráneas y para aumentar los niveles de gasto base en los arroyos cercanos. No obstante, al igual que con todas las prácticas de infiltración, la posibilidad de contaminación del agua subterránea existe y debe ser considerada donde el agua subterránea es una fuente de agua potable (EPA, 1999).



Figura 3-7. Zanja de infiltración. Fuente: sudswales.com

- Cuencas de infiltración (Infiltration Basins): Las cuencas de infiltración, también conocidas como depósitos de infiltración, son depresiones poco profundas en la superficie, de forma irregular, con base ancha y taludes laterales suaves que están diseñadas para interceptar y almacenar un determinado volumen de escurrimiento hasta que se produce su infiltración en el suelo; suelen construirse con un desagüe de emergencia para el caso en que la capacidad de almacenamiento sea superada. Este sistema requiere una aplicación cuidadosa para asegurar que el agua subterránea no se ponga en peligro y de que el sitio de construcción es adecuado para la infiltración. También pueden estar ajardinadas para proporcionar valor estético. Las cuencas de infiltración con vegetación ayudan a evitar la migración de los contaminantes, las raíces pueden aumentar la permeabilidad de los suelos, y por lo tanto la eficiencia de la cuenca.



Figura 3-8. Cuenca de infiltración. Fuente: kenmarkturf.com

Las cuencas de infiltración pueden recoger una mayor cantidad de agua que los pozos y las zanjas de infiltración dado que también permiten, en caso de ser necesario, el almacenamiento temporal de una lámina de agua, aunque normalmente no están diseñados para retener un volumen de forma permanente, su propósito principal es transformar un flujo de agua superficial en un flujo de agua subterránea y eliminar los contaminantes a través de mecanismos tales como filtración y adsorción. Generalmente son planeadas para drenar en un plazo de 72 horas con el fin de evitar la proliferación de mosquitos y posibles problemas de olores así como para asegurar que la cuenca está lista para recibir los escurrimientos de la próxima precipitación (EPA, 1999 y Castro et al., 2005).

Sistemas de captación y transporte

Para García (2011) los sistemas de captación y transporte actúan como primera etapa de tratamiento de los escurrimientos superficiales en un tren de manejo. Su funcionamiento consiste en conducir el agua de lluvia que escurre superficialmente hacia otros sistemas de tratamiento mayor o a los lugares de vertido correspondientes y retener los sedimentos más gruesos que ésta arrastra. Estos sistemas permiten los procesos naturales de filtración, infiltración, oxigenación y evaporación, y se pueden clasificar como drenes filtrantes, cunetas verdes, franjas filtrantes y cubiertas vegetadas.

- **Drenes filtrantes (Filter Drains):** Los drenes filtrantes, también conocidos como drenes franceses, son excavaciones continuas poco profundas (entre 1 y 2 m) recubiertas de un geotextil y rellenas con materiales pétreos gruesos que captan y conducen las aguas pluviales. Estas zanjas pueden contar además con una tubería permeable embebida en el material granular para facilitar la circulación del agua en su interior. Los drenes filtrantes poseen la desventaja de que pueden llegar a colmatarse con facilidad, por lo que sus capas granulares interiores deberán diseñarse cuidadosamente con el fin de maximizar su vida útil. Adicionalmente, es recomendable que tengan una superficie cóncava que permitan la concentración del escurrimiento hacia el centro del elemento (Molina et al., 2011).

El tiempo de estancia del agua en el dren debe ser suficiente para que exista infiltración a través del geotextil. De este modo, en algunos drenes no es necesario dirigir el agua hasta el punto de vertido, pues al cabo de una cierta longitud se ha infiltrado totalmente en el suelo circundante (Castro et al., 2005). Los drenes filtrantes como todos los SUDS se pueden combinar con otros sistemas de forma que aumente su capacidad y ofrezca una mayor atenuación de los escurrimientos.



Figura 3-9. Dren filtrante o francés. Fuente: satuitcon.com

- Cunetas verdes (Swales): Son elementos lineales de drenaje con vegetación, de base ancha y talud tendido en los que el agua superficial puede ser almacenada o transportada. Pueden utilizarse como estructuras de conducción para dirigir el escurrimiento a la siguiente etapa del tren de manejo y para promover la infiltración en donde las condiciones del suelo y del agua subterránea lo permitan.

Las cunetas verdes son diseñadas como canales abiertos en flujo permanente con números de Manning correspondientes a canales vegetados. Podrán remplazar elementos típicos de drenaje tales como cunetas de concreto si se garantiza un dimensionamiento adecuado que permita evacuar los caudales de diseño (Molina et al., 2011). El diseño debe promover bajas velocidades de flujo menores a 1 m/s con el fin de prevenir la posible erosión del terreno y permitir que gran parte de la carga de partículas en suspensión en el escurrimiento sea sedimentada, proporcionando así una eliminación de contaminantes eficaz.



Figura 3-10. Cuneta Verde. Fuente: sudsnet.abertay.ac.uk

- Franjas filtrantes (Filter Strips): Las franjas filtrantes son porciones alargadas y estrechas de tierra vegetada, con una pequeña pendiente, diseñadas para conducir los escurrimientos superficiales y promover la remoción de partículas contaminantes así como la infiltración. Se ubican entre un área de superficie impermeable y una corriente de recepción, sitio de disposición, tratamiento o sistema de manejo de aguas superficiales.

Tratan el escurrimiento mediante filtrado vegetativo; en condiciones de baja velocidad a moderada, reducen eficazmente los niveles de partículas contaminantes mediante la eliminación de sedimentos, materia orgánica y metales.

Las pendientes deben ser poco pronunciadas y los anchos a atravesar por el agua lo mayor posible. Pueden albergar cualquier tipo de vegetación, desde un prado hasta un pequeño bosque. En cualquier caso, a mayor ancho de la franja y densidad de vegetación se obtiene mayor capacidad filtrante y grado de depuración (EPA, 1999).

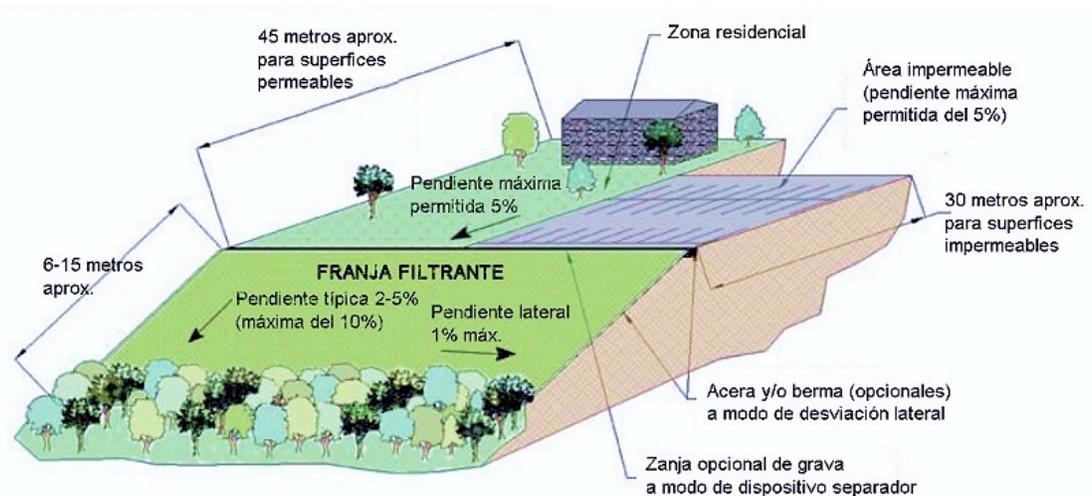


Figura 3-11. Franja filtrante. Fuente: drenajeurbanosostenible.org

- Cubiertas vegetadas o techos verdes (Green Roofs): Las cubiertas vegetadas son un sistema constituido por múltiples capas que cubren el techo de un edificio o estructura. Se colocan sobre una capa de drenaje junto con otras que proporcionan protección, impermeabilización y aislamiento. Están diseñadas para interceptar y retener la precipitación, reducir el volumen de escurrimiento y la atenuación de los flujos máximos. Los techos verdes se pueden utilizar para reducir el volumen y la velocidad de los escurrimientos de manera que puedan ser manejados por otro SUDS aguas abajo.

Los techos verdes son clasificados según Woods-Ballard et al. (2007), en tres categorías:

- Techos verdes extensivos. Son aquellos que cubren la totalidad de la superficie de la azotea, con vegetación de bajo crecimiento y poco mantenimiento. Su acceso queda limitado al mantenimiento y pueden ser instalados en superficies planas o inclinadas. Los techos verdes extensivos cuentan típicamente con un medio de cultivo de 25 mm a 125 mm de espesor en el que crece una variedad de plantas resistentes y tolerantes a la sequía. La vegetación consiste normalmente en musgos, hierbas o pastos y pretende ser autosuficiente. Son ligeros, rentables, y se pueden utilizar en una amplia variedad de lugares con un mantenimiento mínimo.

- Techos verdes intensivos. Se trata de ambientes ajardinados con altos beneficios estéticos, que incluyen jardineras o árboles y cuyo acceso es generalmente permitido. Los techos intensivos generalmente imponen cargas mucho mayores en la estructura del techo y requieren mantenimiento significativo constante.
- Techos verdes intensivos simples. En éstos la vegetación utilizada usualmente es césped o plantas de cobertura. Esta vegetación requiere un mantenimiento regular, incluyendo el riego y el corte. Sin embargo, las demandas sobre las estructuras del edificio son moderadas y el sistema de techo será menos costoso.



Figura 3-12. Cubiertas vegetadas. Fuente: consumo-cuidado.com

El éxito del diseño de un techo verde requerirá de la colaboración entre ingenieros estructurales, arquitectos paisajistas, ecologistas, horticultores, así como de los usuarios o habitantes. Los techos verdes pueden tener un efecto en el rendimiento y la apariencia de edificios individuales, así como de ciudades enteras. Para los diseñadores, un techo verde no debe ser sólo una cubierta eficaz para el control de los escurrimientos, sino también una oportunidad para vincular la estructura al paisaje natural.

Sistemas de almacenamiento

Los sistemas de almacenamiento representan los elementos más conocidos y empleados en la gestión de los escurrimientos pluviales, pues permiten gestionar amplias zonas en comparación con otros SUDS. Tienen por objetivo diferir en el tiempo la alimentación del agua de lluvia hacia otro sistema de drenaje o cuerpo receptor. Se encuentran comúnmente al final de línea del tren de manejo, su funcionamiento permite la reducción de gastos punta, el almacenamiento de los escurrimientos durante un periodo de tiempo determinado y la mejora de la calidad del agua (García, 2011).

- **Depósitos de detención (Detention Basins):** Las cuencas de detención son instalaciones de almacenamiento tanto superficiales como subterráneas que proporcionan el control en la cantidad a través de la atenuación de los escurrimientos de las aguas pluviales. Éstas estructuras son diseñadas para frenar durante un tiempo determinado los escurrimientos de una tormenta y permitir su liberación gradualmente poco después de la precipitación. Son generalmente planificadas para vaciarse completamente entre eventos de escorrentía en menos de 24 horas, por lo que proporcionan principalmente el control de la cantidad en comparación con el control de la calidad del agua; su misión es laminar³ grandes avenidas reduciendo los picos en el caudal y limitando el riesgo de inundaciones, aunque correctamente diseñados permiten también la sedimentación de partículas suspendidas (EPA, 1999).

Existen dos tipos de depósitos de detención utilizados para manejar los escurrimientos de aguas pluviales, éstos pueden ser superficiales y subterráneos. Rodríguez (2013) los describe de la siguiente manera:

- Depósitos de detención superficiales: Depósitos superficiales diseñados para almacenar temporalmente los volúmenes de escurrimientos generados aguas arriba, laminando los gastos punta. Favorecen la sedimentación y con ello la reducción de la contaminación. Pueden emplazarse en zonas alejadas o ser acondicionados para otros usos, como los recreacionales, en parques e instalaciones deportivas.
- Depósitos de detención subterráneos: Cuando no se dispone de terrenos en superficie, o en los casos en que las condiciones del entorno no permitan una estructura a cielo abierto, estos depósitos se construyen en el subsuelo. Se fabrican con materiales diversos, siendo los de concreto armado y los de materiales sintéticos los más habituales.

³ Atenuar y regular el caudal de salida mediante un incremento en el tiempo de respuesta.



Figura 3-13. Cuenca de detención. Fuente: stormwaterpartners.com

- Estanques de retención (Wet ponds): son cuencas o depresiones en el terreno que tienen una reserva permanente de agua para el tratamiento de la calidad. Este volumen de agua constante incrementa el rendimiento en la eliminación de nutrientes, metales pesados, coliformes y materia orgánica (Jiménez, 1999; citado en Castro et al., 2005). Proporcionan almacenamiento temporal del agua de lluvia adicional por encima del nivel de agua permanente. Los estanques de retención pueden proporcionar beneficios a la vida silvestre y de esparcimiento. La diferencia respecto a los depósitos de detención radica en que en los estanques de retención existe una lámina de agua de forma permanente con un reborde vegetado que permite recibir volúmenes adicionales (Castro et al., 2005).



Figura 3-14. Estanque de retención. Fuente: drenajeurbanosostenible.org

- Humedales artificiales (Constructed Wetlands): Los humedales artificiales son superficies amplias de agua construidas artificialmente, con poca profundidad y vegetación propia de pantanos y zonas húmedas, que se basan en la utilización de plantas acuáticas para la eliminación de contaminantes. Éste sistema proporciona un mayor grado de filtración y eliminación de nutrientes gracias a la acción de la vegetación, al retener los escurrimientos por un período prolongado, se permite que los sedimentos se asienten, y se facilite la adhesión de los nutrientes a la vegetación y la descomposición aeróbica. También proporcionan beneficios ecológicos significativos. (EPA, 1999).



Figura 3-15. Humedal artificial. Fuente: cafesciencedundee.co.uk

Los humedales artificiales se pueden clasificar de acuerdo con varios criterios, pero los más importantes son dos (Peña & Lara, 2012): el régimen de flujo del agua, y el tipo de vegetación acuática que crece en él.

De acuerdo con el régimen de flujo del agua los humedales artificiales pueden ser:

- Humedales de flujo libre: Son estanques o canales en los que la superficie del agua se encuentra expuesta a la atmósfera y las plantas emergentes están enraizadas sobre una capa de suelo generalmente impermeabilizado, para evitar la infiltración al manto freático.
- Humedales de flujo subsuperficial: Los humedales con flujo subsuperficial son estanques o canales con el fondo generalmente impermeable sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser arena o grava en el que se siembra la vegetación. El caudal entrante en el humedal artificial llega desde una fuente de pre-tratamiento que puede ser otro SUDS y es distribuido por un colector en la

entrada del humedal por debajo del medio poroso. Después, el agua fluye por debajo de la superficie hasta el colector de salida, manteniéndose por debajo del nivel de la superficie de la capa de grava. Pueden ser de flujo vertical u horizontal.

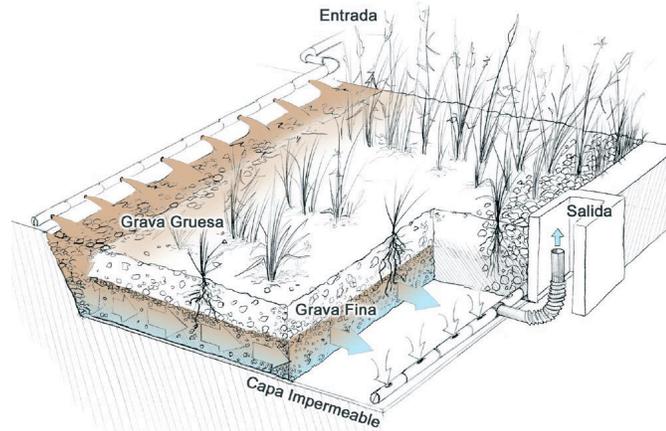


Figura 3-16. Humedal artificial de flujo subsuperficial. Fuente: depuranatura.blogspot.com

→ Humedales de flujo vertical: Un Humedal de flujo vertical es un lecho de filtración con vegetación acuática, en él, los escurrimientos se vierten o dosifican a la superficie desde arriba usando un sistema mecánico, haciendo fluir el agua verticalmente por la matriz del filtro.

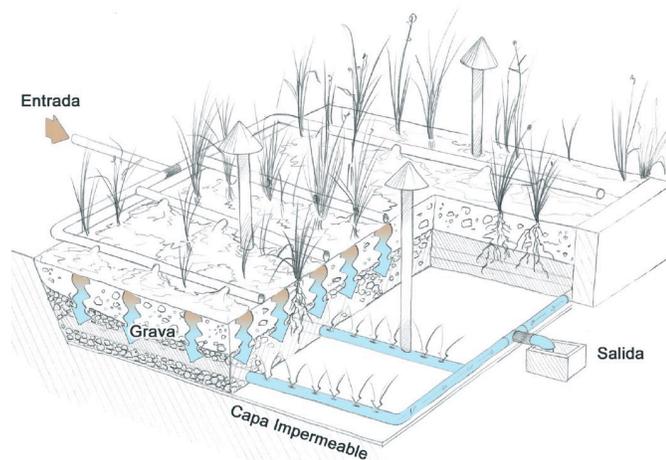


Figura 3-17. Humedal artificial de flujo vertical. Fuente: datateca.unad.edu.co

- Humedales de flujo horizontal: En este tipo de humedales (que puede emplearse como tratamiento secundario), los escurrimientos fluyen a través de un medio poroso (arena o grava), confinado en un canal impermeable, y en el que se planta la vegetación acuática.

Dentro de esta clasificación, los humedales de flujo libre son los más usados para el tratamiento del agua de lluvia, debido a su capacidad para controlar cambios en las características del agua (Peña & Lara, 2012). Sin embargo, para lograr un buen rendimiento en la remoción de contaminantes, es necesario un pre-tratamiento, ya que diferentes sustancias pueden alterar las condiciones de operación de los humedales y disminuir su rendimiento. Por lo general, los tratamientos primarios utilizados provienen de otros SUDS.

Para realizar el diseño adecuado de un humedal artificial, es crucial conocer, entre otros aspectos, la problemática asociada, es decir: origen, calidad y volumen del agua a tratar; destino y calidad de agua que se desea producir, espacio disponible y características del terreno (Luna & Aburto, 2014). En cuanto al tipo de vegetación, se debe incluir en el diseño, vegetación acuática robusta, perenne y de fácil propagación; clasificada en dos tipos: plantas enraizadas o emergentes como *juncos* (*Scirpus* spp.) y *carrizos* (*Phragmites* spp.), y plantas flotantes como la *lentejilla de agua* (*Lemna gibba*). Los humedales requieren un área relativamente extensa, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno y fósforo. El tratamiento es efectivo y requiere muy poco en cuanto a equipos mecánicos, electricidad o atención de operadores capacitados (EPA, 2000).

CAPÍTULO 4

Criterios generales de diseño

No es posible diseñar para todos los eventos probables y siempre habrá casos en los que se sobrepasen los criterios de diseño establecidos, por lo tanto, el proceso de diseño debe ser una evaluación y gestión de riesgos. Las consecuencias de los eventos de mayor magnitud que el evento de diseño deben ser evaluados por sus impactos físicos, económicos, sociales y ambientales.

El propósito de los criterios generales que se incluyen en el presente capítulo es proporcionar un marco para el diseño de un sistema de drenaje eficaz. Los SUDS deben ser diseñados para cumplir los estándares de seguridad, hidráulicos y ambientales, así como los requisitos específicos de cada región. Aunque los sistemas urbanos de drenaje sostenible deben considerar todas las partes del ciclo hidrológico urbano, las aguas pluviales representan un elemento clave, tanto como recurso, como para la protección de los cuerpos receptores. Por esa razón, el enfoque de drenaje sostenible se utiliza principalmente en la gestión del agua de lluvia urbana.

Es importante que las soluciones sean sensibles al agua, es decir, deben acercar la gestión de las aguas de lluvia a su ciclo natural, de manera funcional y estéticamente agradable, útil y aceptada por los habitantes locales. Al respecto, algunos investigadores (Hoyer et al., 2011), consideran que son cinco los principios para lograr un correcto diseño:

- Sensibilidad hacia el agua: Un diseño solo es exitoso si alcanza el objetivo de restaurar o mantener el ciclo natural del agua en la ciudad. Éste se caracteriza por la alta evaporación, alta tasa de infiltración, y bajo escurrimiento superficial. En el entorno urbano típico hay más escurrimiento, menos infiltración, y menos evaporación. En consecuencia, todas las medidas que aumentan la evaporación y reducen el drenaje superficial son adecuadas para un SUDS. En general, el agua urbana debe manejarse lo más cerca posible de la fuente restaurando los sistemas de agua locales a pequeña escala. Los SUDS deben integrarse en la planificación

urbanística general con el fin de contribuir a la conservación ambiental, estética y cultural del espacio urbano.

- Estética: Los SUDS deben ser utilizados para proporcionar beneficios estéticos siempre que sea posible. Los sistemas de drenaje convencionales no están a la vista, y por lo tanto, no están en la mente de los usuarios. Sin embargo, cuando las aguas pluviales se utilizan como elemento de diseño visible, atraen la atención de los habitantes de la ciudad y los invita a seguir los procesos naturales del ciclo hidrológico. Cuando las personas viven cerca del proceso dinámico del agua, son más propensos a apreciar y comprender la importancia del ciclo del agua en las zonas urbanas y pueden potencialmente ser más conscientes y sensibles a las limitaciones de éste recurso.
- Funcionalidad: Los sistemas de drenaje sostenible deben ser utilizados de manera adecuada, adaptada a las condiciones básicas locales y al uso previsto, deberán considerar los requisitos de mantenimiento correspondientes y las posibilidades de adaptación a condiciones cambiantes. Las soluciones son generalmente muy específicas del lugar, por lo tanto, siempre es necesario tener plenamente en cuenta las características del sitio, incluyendo la topografía, la permeabilidad del suelo, nivel freático, y la calidad del agua, entre otras. Además, los planificadores deben ser conscientes de la variedad de medidas técnicas disponibles y la posibilidad de combinarlas para optimizar las soluciones de manejo del agua para un sitio específico. Del mismo modo, como cualquier otro tipo de infraestructura urbana o solución arquitectónica, debe ser flexible de cara a condiciones futuras, como los fenómenos meteorológicos extremos o cambios demográficos.
- Uso: Los SUDS deben tratar de satisfacer las demandas, tanto de conservación ambiental como de recreación. Una gran ventaja propia de los SUDS, como una herramienta para la gestión de las aguas pluviales, es que si se conciben adecuadamente, se pueden utilizar una amplia gama de soluciones para crear lugares que son útiles para múltiples fines.
- Aceptación del público: Un buen diseño SUDS debe considerar las demandas de todas las partes interesadas e involucrarlas en el proceso de planificación. Uno de los objetivos de la planificación de una ciudad es la creación de espacios que respondan a las necesidades de los habitantes y en los cuales ellos puedan intervenir. A menudo es necesaria la participación de los habitantes, propietarios y usuarios en el proceso de planificación, solo así la aceptación, el uso adecuado y el cuidado de los espacios urbanos puede ser sostenible. Además, a través de la participación comunitaria, se pueden conocer las necesidades y deseos de los ciudadanos locales y otros interesados. El debate directo entre las partes ofrece la

oportunidad de discutir las ventajas y desventajas del manejo de las aguas pluviales. Si los futuros usuarios de las instalaciones no son considerados en el proceso de planificación, deberán utilizarse soluciones flexibles que tengan la capacidad de adaptarse a las necesidades individuales.

4.1 Tren de manejo

La gestión eficaz del agua de lluvia se logra mejor a partir de un enfoque de sistema, en lugar de un enfoque que se centre en prácticas individuales. Algunas prácticas individuales pueden no ser muy eficientes por sí solas, pero en combinación con otros elementos, pueden proporcionar sistemas altamente eficaces.

Para reproducir el ciclo hidrológico previo a la urbanización en la mayor medida posible, se requiere un "*management train o tren de manejo*" de los escurrimientos. Este concepto es fundamental para que el diseño de un SUDS sea exitoso y se basa en el uso de técnicas de drenaje en serie para reducir progresivamente la contaminación y volumen de los escurrimientos (Woods-Ballard et al., 2007). Las distintas técnicas deben combinarse buscando la solución que logre beneficios cualitativos y cuantitativos en la administración de agua, la medida en que esto sea posible dependerá de las características y limitaciones del sitio en particular.

De acuerdo con Perales & Andrés-Doménech (2007) y Perales & Valls (2012) la jerarquía de las técnicas que debe considerarse en el diseño del tren de manejo incluye las siguientes etapas (Figura 4-1):

- Prevención: La primera línea de defensa es la prevención, tanto de la contaminación, mediante el barrido frecuente de las superficies, como de la generación de escurrimientos superficiales, minimizando las superficies impermeables.
- Manejo en el origen: El segundo eslabón es el manejo en el origen, controlando los escurrimientos en el sitio en donde se generan, es decir, azoteas, calles, plazas, jardines, etc., reduciendo volúmenes y procurando un primer tratamiento de calidad, con el empleo de cubiertas vegetadas, superficies y pavimentos permeables, franjas filtrantes, pozos y zanjas de infiltración. El empleo de técnicas de control en el origen reduce la tasa de escurrimiento pico, requiriendo una capacidad menor de las instalaciones aguas abajo. La captación de forma individual de las aguas superficiales en tales sitios, puede no ser muy importante, pero en su conjunto puede tener un beneficio significativo.

- Manejo en el entorno urbano: La siguiente etapa es el manejo en el entorno urbano, para continuar con la reducción de caudales y carga contaminante. Los SUDS empleados a este nivel suelen ser: cunetas verdes, drenes filtrantes, depósitos de infiltración y depósitos de detención. Un entorno urbano podría ser un centro comercial, una zona industrial o un desarrollo residencial.
- Manejo en cuencas: La cuarta y última etapa, en caso de ser necesaria, es el manejo a nivel de cuenca, con el empleo de estanques de retención y humedales artificiales.

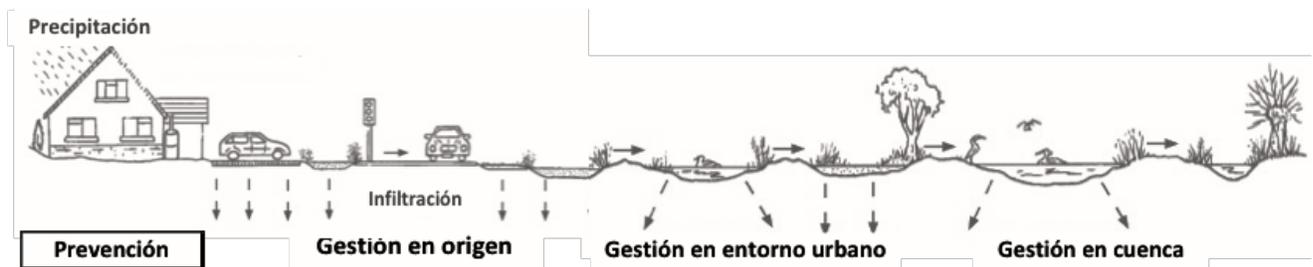


Figura 4-1. Tren de manejo SUDS. Fuente: Adaptado de anglianwater.co.uk

Un tren de manejo establece un plan para hacer frente a los escurrimientos superficiales urbanos. Comienza con el control en el origen, donde se emplean sistemas que reciben el agua directamente después de la precipitación, en este punto, los escurrimientos superficiales son transformados en escurrimientos subterráneos por medio de la infiltración, se captan o transportan a un cuerpo de agua receptor. El excedente pasa a la siguiente etapa, el manejo en el entorno urbano, donde los SUDS tratan con pequeñas cantidades de escurrimiento y permiten nuevamente la infiltración en los suelos circundantes y la eliminación de contaminantes. El agua restante se transporta entonces a otro sitio para su manejo a nivel de cuenca o regional. Estos componentes SUDS suelen tratar con grandes volúmenes de agua y son el último punto para hacer frente a los escurrimientos. Deben permitir niveles moderados de remoción de contaminantes, aunque muchos ya deberían haber sido removidos. Las cuencas de detención son un ejemplo de un control regional que permite altos volúmenes de detención de agua. Después de esta etapa, es probable que el agua se libere poco a poco en un cuerpo receptor. El paso del agua entre las distintas partes del tren de manejo se hace a través del uso de sistemas de transporte naturales como, cunetas verdes y drenes filtrantes siempre que sea posible, aunque pueden ser necesarias tuberías subterráneas, sobre todo cuando el espacio es limitado. También se requerirán rutas de flujo superficial para controlar las crecidas de forma segura durante eventos extremos. En general, cuanto mayor sea el número de técnicas utilizadas en serie, mejor será el rendimiento y menor será el riesgo de fallo del sistema en general (Woods-Ballard et al., 2007 y Lashford et al., 2012).

Las técnicas localizadas aguas arriba en la jerarquía son preferibles a las que están aguas abajo de modo que la prevención y el control en la fuente siempre deben ser considerados antes que controles regionales. Sin embargo, en los casos en que están restringidas las oportunidades, se debe emplear en serie un conjunto de opciones de menor jerarquía. El agua debe ser transportada a otro lugar sólo si no se puede tratar en el sitio (Woods-Ballard et al., 2007).

El concepto de tren de manejo promueve la división de la zona a ser drenada en subcuencas con diferentes características de drenaje y usos de suelo, cada una con su propia estrategia de drenaje. Tratar con el agua a nivel local, reduce la cantidad que tiene que ser administrada aguas abajo.

4.2 Sostenibilidad

Los SUDS adecuadamente diseñados, construidos y mantenidos son más sostenible que los métodos convencionales de drenaje, ya que pueden mitigar muchos de los efectos adversos sobre el ambiente generados por los escurrimientos de aguas pluviales. Los SUDS deben considerarse dentro de un marco integral basado en el concepto de sostenibilidad. Esto significa que todos los costos ambientales, junto con los factores económicos y sociales, deben ser evaluados en el proceso de toma de decisiones, especialmente cuando se comparan los SUDS con los sistemas de drenaje convencional (Woods-Ballard et al., 2007).

Para evaluar la sostenibilidad de un sistema de drenaje, se deben identificar los factores que intervienen en su implantación, tales como la energía necesaria para la construcción, la pérdida de hábitat, el impacto de las inundaciones en la infraestructura etc. Para alcanzar los objetivos de sostenibilidad, algunos autores (Woods-Ballard et al., 2007 y Perales, 2008) proponen los siguientes principios que rigen el diseño de un SUDS:

- Almacenar o conducir con seguridad la esorrentía de las precipitaciones extremas sin poner en riesgo el entorno natural y urbano.
- Reducir, en la medida de lo posible, el riesgo de inundaciones asociadas.
- Reducir los contaminantes de los escurrimientos urbanos y mejorar la calidad del agua pluvial.
- Proporcionar, siempre que sea factible, beneficios ecológicos y estéticos.
- Preservar la calidad del agua de los cuerpos receptores de los escurrimientos urbanos.
- Respetar el régimen hidrológico natural de las cuencas, reduciendo el volumen de los escurrimientos superficiales y gastos pico procedentes de

zonas urbanizadas, con la ayuda de elementos de retención en el origen y minimizando áreas impermeables.

- Integrar la gestión y el tratamiento de las aguas de lluvia en el paisaje, minimizando el costo de la infraestructura de drenaje al mismo tiempo que aumenta el valor del entorno.
- Reducir la demanda de agua potable, administrando integralmente los recursos hídricos al fomentar la reutilización en el origen tanto de aguas pluviales como grises.

4.3 Criterios hidráulicos

Si bien son muchas las disciplinas que intervienen en la etapa de diseño, la hidrología y la hidráulica pueden considerarse las más importantes de cara al correcto dimensionamiento de la infraestructura.

La mayoría de las instalaciones de manejo de agua deben diseñarse para incorporar un volumen de almacenamiento para el control de inundaciones por encima de la superficie libre permanente necesaria para el tratamiento de la calidad. En estos casos se requerirá una salida para proporcionar el control del gasto excedente proveniente de una precipitación mayor a la de diseño.

Considerar una tormenta de diseño apropiada para el tamaño de una instalación es probablemente el factor más importante en el diseño de un dispositivo eficaz. No es cierto que cuanto más grande sea la tormenta de diseño, más efectivo será el sistema. Los controles diseñados para mejorar la calidad del agua y el control de los gastos aguas abajo deben ser emparejados con el tipo de instalación utilizada, la hidrología local y las necesidades de los usuarios. La lluvia es el origen del proceso, por lo que su caracterización es fundamental para abordar con éxito los problemas de diseño asociados.

4.3.1 Características de una tormenta

La interpretación del comportamiento de una cuenca hidrológica ante una tormenta es uno de los factores que implica mayor incertidumbre para el diseño y operación de una obra hidráulica, existiendo siempre el riesgo potencial de que la capacidad de la obra resulte insuficiente ante el eventual desarrollo de tormentas extremas dentro del área de influencia de la misma (Malinow, 2004).

Se conoce como tormenta al conjunto de precipitaciones⁴ que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas, por lo que una tormenta puede durar desde pocos minutos hasta varias horas o incluso días y pueden abarcar desde pequeñas extensiones de terreno hasta grandes zonas.

Para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca y de la infraestructura es necesario determinar sobre una base espacial y temporal las características principales que definen a la tormenta de diseño, éstas son: la intensidad, la duración y el periodo de retorno. Para ello es necesario un gran número de datos extraídos de las estaciones pluviométricas con el propósito de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis y uso posterior.

4.3.1.1 Intensidad, duración, periodo de retorno

Las relaciones entre la intensidad, la duración y el periodo de retorno permiten caracterizar las tormentas en un lugar determinado, se establecen con base en un análisis estadístico de las lluvias registradas en los pluviógrafos de la zona (MINVU, 2005). La intensidad y la duración de la lluvia son dos conceptos asociados y su estudio es primordial porque los escurrimientos superficiales ocurren sólo después de exceder un cierto límite: o la intensidad de una lluvia excede la tasa de infiltración, o la intensidad y la duración de la precipitación exceden la capacidad de almacenaje de agua del suelo.

La intensidad (i) se define como la relación entre la cantidad total de lluvia (lámina de agua) que cae y un período determinado, se expresa en lámina de agua por unidad de tiempo, generalmente como mm por hora (mm/h) y es inversamente proporcional a la duración. Éste parámetro generalmente se calcula para varios intervalos de tiempo y diferentes períodos (FAO, 2000). Mientras que la duración (d) es simplemente el intervalo de tiempo transcurrido desde que inicia la precipitación hasta que ésta cesa medido en minutos (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Por otro lado, el período de retorno (T) en uno de los parámetros más significativos a ser tomado en cuenta en el momento de dimensionar una obra hidráulica destinada a soportar avenidas, y representa el lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento de igual o mayor a una magnitud establecida. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad (P), del m -ésimo evento de los n registros como indica la ecuación (3) (Colegio de Postgraduados, 2012).

⁴ El concepto de precipitación abarca todos los productos derivados de la condensación del vapor atmosférico que caen sobre la superficie, ya sea en forma de llovizna, lluvia, granizo o nieve.

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad y \quad P = \frac{m}{n + 1} \quad (3)$$

donde: T = Periodo de retorno (años)
 n = Número de años de registro
 m = Número de orden
 P = Probabilidad

Para determinar la relación entre las variables i , d y T (intensidad-duración-periodo de retorno) de un sitio determinado, se consideran dos métodos que pueden ser utilizados. El primero, basado en un modelo probabilístico, relaciona la intensidad y el periodo de retorno para cada duración por separado mediante alguna de las funciones de probabilidad usadas en hidrología. El segundo método relaciona simultáneamente las tres variables en una familia de curvas cuya ecuación correspondiente a un modelo determinístico, de acuerdo con Aparicio (2007), es:

$$i = \frac{kT^m}{(d + c)^n} \quad (4)$$

donde: i = Intensidad (mm/h)
 d = Duración (min)
 T = Periodo de retorno (años)
 c = Constante de ajuste

las constantes k , m , n y c , se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, cuyo estudio escapa al alcance de esta investigación. Si se aplican logaritmos a la ecuación (4), se obtiene:

$$\log i = \log k + m \log T - n \log(d + c)$$

o bien:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (5)$$

donde: $y = \log i$, $a_0 = \log k$, $a_1 = m$
 $x_1 = \log T$, $a_2 = -n$, $x_2 = \log(d + c)$

La ecuación (5) representa una familia de líneas rectas de pendiente a_2 , ordenada al origen a_0 y espaciamiento a_1 . Si los datos registrados de i , d y T se grafican en papel logarítmico, usualmente se agrupan en torno a líneas rectas, aunque a veces, las líneas resultan ligeramente curvas (Figura 4-2), lo que se puede corregir agregando a las duraciones un valor constante c . Al hacer un ajuste de correlación lineal múltiple, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \Sigma y = Na_0 + a_1 \Sigma x_1 + a_2 \Sigma x_2 \\ \Sigma(x_1 y) = a_0 \Sigma x_1 + a_1 \Sigma(x_1)^2 + a_2 \Sigma(x_1 x_2) \\ \Sigma(x_2 y) = a_0 \Sigma x_2 + a_1 \Sigma(x_1 x_2) + a_2 \Sigma(x_2)^2 \end{cases} \quad (6)$$

donde N es el número de datos disponibles y las incógnitas son a_0 , a_1 y a_2 y x_1 , x_2 y y son, respectivamente, los logaritmos del periodo de retorno, la duración (con el valor c de ajuste agregado de ser necesario) y la intensidad, obtenidos de un registro de precipitación. Una vez calculados los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 es posible determinar los parámetros k , m y n de la ecuación (4).

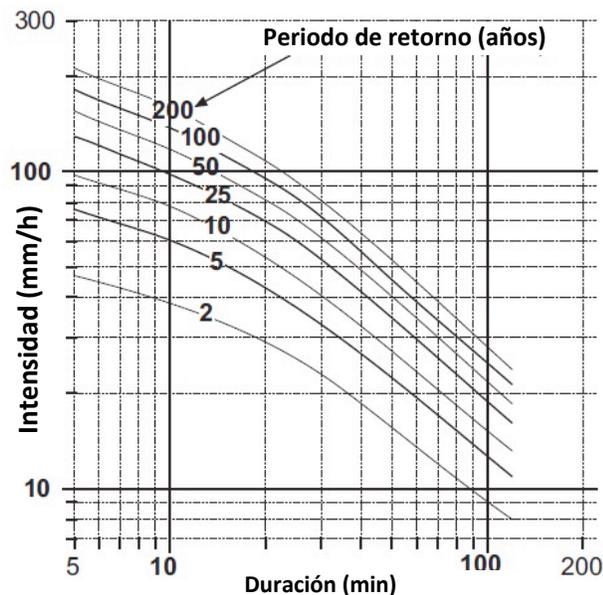


Figura 4-2. Ejemplo de curvas i - d - T . Fuente: zonaingenieria.com

Esta representación gráfica conocida como curvas i - d - T , permite obtener la intensidad máxima de precipitación en una zona particular durante el paso de tormentas de distinta duración relacionando esta intensidad a un período de retorno específico para el diseño de estructuras hidráulicas considerando su riesgo de falla. Dicha intensidad se traduce posteriormente a una avenida de diseño mediante alguna relación lluvia - escurrimiento (Navarro, 2007).

4.3.1.2 Calidad del agua de lluvia

La calidad del agua es un parámetro que afecta todos los aspectos de los ecosistemas y del bienestar humano, como la salud, el alimento que se ha de producir, las actividades económicas, el equilibrio de los ecosistemas y la biodiversidad biológica, por lo que la calidad del agua influye también sobre la pobreza humana, la riqueza y los niveles de educación. Desde el punto de vista administrativo, la calidad del agua se define por su uso final deseado. En consecuencia, el agua destinada a la recreación, la pesca, para beber y para el hábitat de organismos acuáticos requiere de un alto nivel de pureza, mientras que para la producción de energía hidroeléctrica, por ejemplo, las normas de calidad son mucho menos relevantes, por lo que es importante tener presente que los límites tolerables de las diversas sustancias contenidas en el agua que son normadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), y por los gobiernos nacionales, pueden variar ligeramente entre sí (UN-WATER, 2010 y Osornio, 2012).

En México existen normas que regulan la calidad del agua para sus distintos usos especificando los límites permisibles de los distintos contaminantes, particularmente, la norma oficial NOM-015-CONAGUA tiene como objetivo proteger la calidad del agua de los acuíferos, así como, aprovechar el agua de lluvia y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial, mientras que la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, establece los estándares con los que debe cumplir el agua para consumo humano.

En general, la calidad del agua en el mundo está disminuyendo, fundamentalmente debido a las actividades humanas. El deterioro de la calidad del agua se produce cuando la infraestructura urbana e industrial para el manejo del agua y de saneamiento, o ambas, trabajan con sobrecarga, o cuando esa infraestructura es inexistente o es obsoleta y las aguas contaminadas se vierten directamente al medio ambiente. La degradación de la calidad del agua dulce puede redundar en el deterioro del funcionamiento de los ecosistemas y dar lugar a cambios bruscos y desproporcionados, tan pronto se rebasan determinados límites, el sistema puede cambiar a un estado muy diferente y colapsar (UN-WATER, 2010).

Anteriormente, se creía que el agua de lluvia era limpia y que su colecta y transporte, junto con el agua residual en redes unitarias la ensuciaban. Desafortunadamente, la contaminación atmosférica, el arrastre de basura, polvo y material depositado en el suelo han hecho que su calidad se deteriore. El Distrito Federal, además de la creciente demanda de agua y la gran cantidad de aguas residuales producidas, tiene el problema de la contaminación del agua por lavado atmosférico durante los eventos de precipitación, de este modo, entran al agua el monóxido de carbono, óxidos de azufre y

nitrógeno, hidrocarburos y metales pesados como plomo cadmio y zinc, Tabla 4-1 (Jiménez, 2001).

Tabla 4-1. Contaminantes adquiridos durante el lavado atmosférico.

Contaminante mg/L	Zona residencial media	Zona Mixta	Comercial	No Urbana
SST	101	67000	69000	7000
Pb	0.144	0.114	0.104	0.03
Cu	0.033	0.027	0.029	-
Zn	0.135	0.154	0.226	0.195
NTK	1.900	1.290	1.180	0.965
Nox	0.736	0.558	0.572	0.543
PT	0.383	0.263	0.201	0.121
P elemental	0.143	0.056	0.08	0.026

SST: Sólidos suspendidos totales

Pb: Plomo

Cu: Cobre

Zn: Zinc

NTK: Nitrógeno total Kjeldahl

Nox: Óxidos de nitrógeno

PT: Fósforo total

P elemental: Fósforo elemental

Fuente : Jiménez 2001

4.3.2 Mecanismos de control cuantitativo

El control cuantitativo implica mantener el valor del coeficiente de escurrimiento natural, lo que significa reducir zonas impermeables, mantener arroyos y causes conservando sus condiciones originales, aprovechar los volúmenes generados por la precipitación para aplicaciones de consumo de agua no potable como el uso comercial, industrial, la recreación, irrigación de áreas verdes y otros usos permisibles conforme a la normatividad vigente. También se debe promover la infiltración y controlar la formación de escurrimientos que provoquen daños o inundaciones en el sitio y en su zona de influencia aguas abajo (Cabrera & Méndez, 2012). Como medidas de control cuantitativo pueden considerarse los procesos de infiltración, detención y retención, transporte y captación.

Infiltración

La infiltración es el medio más eficaz para el control de los escurrimientos de aguas pluviales, ya que reduce físicamente el volumen del escurrimiento superficial drenado, y por lo tanto los impactos adversos que las grandes cantidades de agua superficial pueden causar. Los sistemas de infiltración permiten la penetración del agua en el suelo en un período determinado, lo que reduce el volumen del escurrimiento durante el evento de precipitación, y por lo tanto el volumen de almacenamiento requerido.

La infiltración es también importante para el control de contaminantes; la infiltración y retención del agua de lluvia, remueve ciertos contaminantes, mejorando la calidad del escurrimiento (Fernández, Montt & Rivera, 2004). Cuando el agua se infiltra en el suelo, metales y nutrientes pueden ser eliminados mediante filtración, adsorción, o algún otro mecanismo. Donde no hay riesgo de contaminación, el proceso se puede utilizar para recargar fuentes de aguas subterráneas y alimentar a los flujos base de los cursos de agua locales. Esta es la solución más conveniente para la gestión de los escurrimientos ya que restaura los procesos hidrológicos naturales. Sin embargo las tasas de infiltración varían con el tipo de suelo, condiciones antecedentes y con el tiempo. En general, la infiltración no se puede utilizar en las áreas donde las fuentes de agua subterránea son vulnerables (EPA, 1999 y Woods-Ballard et al., 2007).

El proceso de infiltración se define como el movimiento descendente del agua a través de la superficie del suelo y hacia el interior del mismo producido por las fuerzas capilares y gravitacionales. Su análisis tiene un papel de primer orden en la relación lluvia-escurrimiento, y por lo tanto en los problemas de diseño asociados al dimensionamiento y operación de las obras hidráulicas (Aparicio, 2007).

La infiltración puede realizarse a cualquier velocidad, desde prácticamente nula hasta la denominada capacidad de infiltración del suelo. Si la intensidad de lluvia es menor que la capacidad de infiltración no debe llamarse capacidad, sino velocidad de infiltración. Puede haber infinitas velocidades de infiltración pero existe una sola capacidad para un tiempo y un suelo determinado. Este proceso fue estudiado por Horton en 1940, quien propuso la ecuación (7) utilizada para determinar la capacidad de infiltración, definida como la cantidad de agua (en lámina) que el suelo es capaz de absorber en la unidad de tiempo expresada en mm/h.

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt} \quad (7)$$

- donde: f = capacidad de infiltración en un tiempo t [mm/h]
 f_c = capacidad de equilibrio, que se da cuando el suelo está saturado [mm/h]
 f_0 = volumen de la partícula
 t = tiempo [h]
 K = constante que representa la tasa de decrecimiento de la capacidad de infiltración

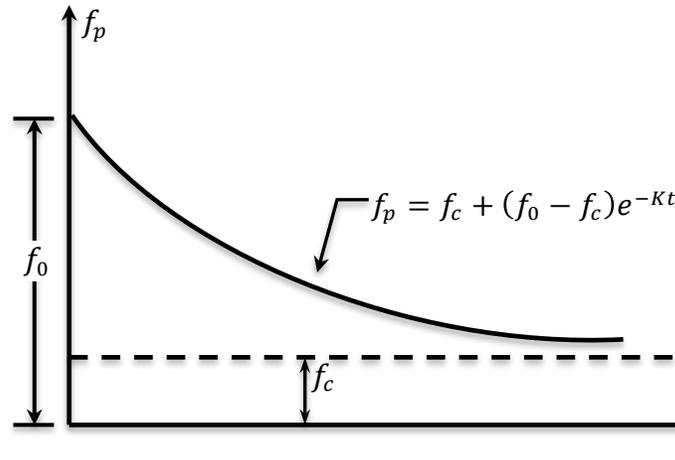


Figura 4-3. Capacidad de infiltración según Horton. Fuente: Adaptado de Aparicio 2007

Si al inicio de una tormenta el suelo está seco, de tal manera que la capacidad de infiltración es mayor que la intensidad de la lluvia, implica que toda la lluvia se infiltrará. Con el tiempo, si la lluvia es lo suficientemente intensa, la humedad del suelo aumentará hasta que se llega a la saturación. La capacidad de infiltración irá disminuyendo y llegará un momento en que será menor que la intensidad de precipitación, en ese instante comenzará a formarse una lámina de encharcamiento dando comienzo al escurrimiento superficial directo. A este tiempo se le denomina *tiempo de encharcamiento*. Bajo las condiciones anteriores la capa saturada, que en el momento que se da el encharcamiento era muy delgada, crece a medida que su límite inferior, llamado *frente húmedo*, baja. El área bajo la curva representa la profundidad del agua infiltrada durante un intervalo de tiempo. Si la intensidad de precipitación nunca excede la capacidad de infiltración final, no habrá escurrimiento (Oñate-Valdivieso, 2009).

Pese a su importancia, la infiltración recibe poca atención por parte de los proyectistas, probablemente por la falta de herramientas adecuadas para su estudio. Sin embargo, existen tres metodologías generales que pueden utilizarse para estimar la infiltración en una cuenca (Oñate-Valdivieso, 2009): haciendo medidas directas en el campo por medio de infiltrómetros, utilizando coeficientes obtenidos de los hidrogramas o por medio de métodos empíricos, tal como el propuesto por el Soil Conservation Service.

- En el primer caso, los infiltrómetros se utilizan para realizar medidas muy locales y, con ellos, la capacidad de infiltración se determina directamente. Con bastantes consideraciones, los valores obtenidos pueden aplicarse a pequeñas cuencas relativamente homogéneas. Cuando la cuenca es de dimensiones mayores, el suelo no es homogéneo, o existen variaciones en la vegetación, deberá subdividirse en áreas que lo sean y realizar mediciones con infiltrómetros en cada una de ellas.

- En el segundo caso, existen diversos índices o coeficientes utilizados en la estimación de la infiltración en una cuenca como respuesta a una lámina precipitada. Estos índices determinan la infiltración utilizando los hidrogramas y el hietograma de la tormenta correspondiente; el más usado, conocido como índice de infiltración media (ϕ) se define como la intensidad media por encima de la cual toda la precipitación se transforma en escurrimiento superficial directo. El principio en que se basa el método es la separación en el hidrograma de la parte que corresponde a la escorrentía superficial directa del gasto base.
- De acuerdo a este método el valor de la capacidad de infiltración media (f), en mm/h, se estima igual al 10% de la llamada infiltración potencial (S), según se dedujo a partir de las observaciones experimentales realizadas en Estados Unidos, con diferentes tipos de suelos (Campos, 1998). El valor de S , en milímetros se calcula con la ecuación (8), en función del parámetro N denominado número de la curva de escurrimiento del complejo hidrológico suelo-cobertura:

$$S = \frac{25,400}{N} - 254 \quad (8)$$

entonces:

$$f = 0.10(S)$$

En la mayoría de los casos, el área del sistema de infiltración será considerablemente menor que el área impermeable que esta siendo drenada. A excepción del tipo más permeable de suelo, la tasa de flujo de entrada al sistema de infiltración (producto de la intensidad de lluvia y área drenada) será superior a la tasa de flujo de salida (producto del coeficiente de infiltración del suelo y la zona de infiltración). Por lo tanto, es necesario que el sistema sea diseñado en conjunto con algún elemento que tenga la capacidad de manejar los volúmenes excedentes, como un área de almacenamiento o una conducción hacia otra instalación. Proveer suficiente capacidad de almacenamiento es esencial para diseñar correctamente un sistema de infiltración. Si el sistema de infiltración está diseñado de forma incorrecta, la tasa de flujo de salida puede no ser suficiente y pueden ocurrir inundaciones.

Una de las mayores incertidumbres en el diseño de sistemas de infiltración es la capacidad de infiltración ya que este parámetro varia con el tiempo, particularmente si no incluye un pre tratamiento eficaz como parte del diseño o el sistema es deficiente. Considerando lo anterior, se introduce un factor de seguridad en el procedimiento de diseño que reduce el valor observado de la capacidad de infiltración. El factor utilizado depende de las consecuencias en caso de falla y se requiere el juicio de ingeniería para determinar el factor que se utilizará (Woods-Ballard et al., 2007).

Los sistemas de infiltración se pueden incorporar en diversos escenarios, incluyendo jardines públicos y privados, jardineras en las carreteras, parques, calzadas, camellones, etc. Adicionalmente, se pueden utilizar para embellecer el entorno, especialmente en aquellas zonas en las que el área pavimentada es grande. Cuando se integran en zonas comunitarias la percepción pública del ambiente puede mejorar significativamente.

Detención y retención

Un requisito fundamental de un sistema urbano de drenaje sostenible es disminuir el riesgo de inundaciones y los daños asociados a la propiedad pública y privada. El agua de lluvia es detenida o retenida con la finalidad de reducir el volumen de agua superficial, y con ello el riesgo de inundaciones localizadas y la sobre carga en las alcantarillas de aguas pluviales. Normalmente, los sistemas de detención y retención almacenan temporalmente el agua y permiten gradualmente su infiltración en el suelo o su transporte hacia otro sistema, además, tanto la detención como la retención del agua superficial en un desarrollo urbano puede ayudar a mantener la recarga natural y el balance del agua subterránea, ayudando a la supervivencia de la vegetación en el entorno urbano (Hoyer et al., 2011). Esto se logra mediante el uso de un dispositivo de almacenamiento y una salida restringida. El volumen de almacenamiento se puede ubicar dentro de un depósito seco, por encima de un volumen de agua permanente en una cuenca o bajo tierra en depósitos diseñados para tal propósito. En general, aunque el almacenamiento puede ayudar a reducir la tasa de flujo máximo del escurrimiento, la duración de éste se extenderá y el volumen total seguirá siendo el mismo. Durante los períodos de sequía, estos espacios pueden ser utilizados para la recreación. Si los sistemas son cuidadosamente diseñados, los visitantes pueden disfrutar del agua retenida después de fuertes lluvias.

- Biorretención: Como caso particular de los sistemas de retención se encuentran los sistemas de biorretención que se basan en la utilización del suelo y la vegetación para eliminar contaminantes. Los sistemas de biorretención pueden ser de distintos tamaños y formas, y soportan diferentes tipos de vegetación. Debido a esta diversidad, pueden emplearse en gran variedad de espacios urbanos.

Transporte

El transporte de los escurrimientos superficiales de un lugar a otro puede realizarse a través de una gama de sistemas incluyendo canales abiertos, tuberías y zanjas. El transporte controlado es una herramienta esencial para la gestión de los flujos y la vinculación entre los componentes SUDS. El transporte sin control a un punto de descarga en el ambiente no se considera sostenible.

Las tuberías subterráneas son todavía de uso común para la conducción, el drenaje y la conectividad entre elementos para un sitio determinado. Cualquier tubería utilizada en un SUDS destinado a la gestión del agua de lluvia en una ciudad, se diseña sobre la base de que todas las superficies impermeables dentro del área de influencia del sistema, contribuye al volumen de escurrimiento, incluso si éste es atenuado o reducido por otro SUDS. Esta es una precaución para asegurarse de que en caso de falla a largo plazo, o debido al cambio de las prácticas de drenaje en un futuro, no darán lugar a inundaciones debido a que la capacidad de las tuberías sea sobrepasada, lo que requeriría una futura modificación de la red (Woods-Ballard et al., 2007).

Los canales abiertos para aguas pluviales son una alternativa a las alcantarillas subterráneas, ya que pueden conducir el agua de superficies impermeables, como los tejados y las calles. Adicionalmente, los canales abiertos pueden cambiar significativamente la percepción del espacio urbano al mismo tiempo que proporcionan un vínculo visible entre otros sistemas en un tren de manejo, exponiendo el ciclo del agua a los usuarios. Pueden diseñarse para contener vegetación y vincularse a filtros, caídas de agua, o zonas de almacenamiento.

Algunas unidades SUDS, por ejemplo las cunetas verdes están diseñados principalmente como obras de conducción. Una simple estimación de la velocidad de flujo de una unidad de conducción se puede calcular usando la ecuación de Manning (9), que determina el caudal en cualquier canal de forma y rugosidad dada, de acuerdo con:

$$Q = \frac{AR_h^{2/3}S^{1/2}}{n} \quad ; \quad \text{siendo} \quad R_h = \frac{A}{P} \quad (9)$$

donde: Q = Gasto en el canal (m^3/s)

A = Área hidráulica (m^2)

P = perímetro mojado (m)

R_h = Radio hidráulico (m)

S = Pendiente del canal (m/m)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$)

Captación

La captación de agua de lluvia, también conocida como cosecha de agua, es la captura y uso de los escurrimientos directamente en el sitio. Éstos se pueden emplear para uso doméstico, por ejemplo en inodoros con cisterna, o el riego de los paisajes urbanos. La contribución de tales sistemas a la gestión del riesgo de inundación, dependerá de la capacidad del sistema para recolectar y almacenar el agua. El diseño tendrá que asegurar que el almacenamiento para el control de los escurrimientos esté siempre disponible, y que exista un riesgo aceptablemente bajo de que el sistema se encuentre lleno en el momento de requerirse.

El agua de los techos y superficies impermeables, por ejemplo de estacionamientos, puede almacenarse y utilizarse en y alrededor del sistema para una variedad de propósitos que no requieran que el agua sea potable. Los sistemas de captación de agua de lluvia puede ser capaces de proporcionar agua potable, pero probablemente se requiera de sistemas de tratamiento sofisticados y seguimiento para asegurar el cumplimiento de la normatividad mexicana relativa a la calidad del agua para uso y consumo humano.

De acuerdo con los principios de diseño establecidos por la institución gubernamental *Melbourne Water* en Australia (City of Melbourne, 2011), puede diferenciarse entre la captación de agua local y la captación de agua regional:

- Captación local: Los volúmenes de precipitaciones más pequeños son fáciles de captar porque el equipo necesario (como tanques de almacenamiento) para mantener este volumen de escurrimiento es relativamente pequeño, pero capaz de ayudar a satisfacer algunas de las demandas domiciliarias. La captación de aguas pluviales también ayuda a reducir los contaminantes en el agua, particularmente la carga de nitrógeno proveniente de los contaminantes atmosféricos. Una reducción en nitrógeno significa un crecimiento menor de algas y plantas acuáticas.

La captura y el uso del agua de lluvia es una opción ambientalmente preferible para el abastecimiento de suministros de agua. El agua de lluvia capturada de un techo tiene un bajo nivel de contaminantes y esto significa que el tratamiento no siempre será necesario. Debido a que el agua se reutiliza en el mismo sitio, los materiales se reducen al mínimo y se necesita menos energía para bombear el agua a su destino final. Esto reduce el consumo de recursos y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociados.

- Captación regional: La captación de agua a nivel regional permite gestionar una mayor cantidad de agua de lluvia, que se recogerá una vez que ha aterrizado en carreteras, calles, estacionamientos y otras áreas impermeables, por lo que requerirá más tratamiento que la cosecha de agua de lluvia local, pero menos tratamiento que muchas opciones de reciclaje de agua. La cosecha regional, en general, requiere una planificación cuidadosa para las grandes áreas de almacenamiento una vez que el agua ha sido capturada y tratada.

Cada sistema tiene ventajas y desventajas con respecto a la seguridad, el funcionamiento, la eficiencia en el manejo del agua, eficiencia energética, ruido, mantenimiento, espacio requerido y la carga requerida para las distintas aplicaciones. La selección y ubicación del sistemas de captación de agua de lluvia depende de las condiciones locales y el uso previsto para el agua recolectada. El agua que se va a utilizar para el riego se puede cosechar de cualquier superficie, siempre que los escurrimientos cumplan con los estándares mínimos de calidad. Si el agua de lluvia se va a utilizar en edificaciones para fines tales como descarga de inodoros, lavado, o en los sistemas de refrigeración, las superficies de captación deben estar relativamente libre de basura y sedimentos. Para lograr un diseño adecuado del sistema destinado para tal propósito, algunos investigadores (Woods-Ballard et al., 2007) hacen las siguientes consideraciones:

- Área de drenaje: El tamaño de la superficie requerida depende del volumen de la demanda para la utilización de agua de lluvia y de las características locales de precipitación.
- Espacio requerido: Los tanques de almacenamiento para la cosecha de agua de lluvia pueden ser estructuras tanto superficiales que requieren de un área adicional para dar cabida a la demanda de agua además de su volumen de retención de aguas pluviales, como subterráneas que no requieren espacio en la superficie. Los requisitos de espacio de los tanques superficiales dependen de su volumen de almacenamiento y diseño.
- Localización: Las instalaciones de aprovechamiento de agua de lluvia idealmente deben estar situadas en o cerca del lugar previsto para el uso del agua. Técnicamente se pueden ubicar en casi cualquier lugar en las zonas urbanas, por ejemplo en techos y áreas de estacionamiento,

4.3.3 Mecanismos de control cualitativo

Para Parker (2010) un parámetro para la clasificación de dispositivos SUDS es su potencial de eliminación de contaminantes. Diversos investigadores sugieren que los elementos SUDS se seleccionen mediante la identificación de su eficiencia en los diversos mecanismos de remoción. Para que este enfoque tenga éxito, es necesario entender los mecanismos de eliminación clave que tienen lugar en los SUDS. Estos incluyen procesos físicos, físico-químicos y biológicos (Figura 4-4).

Los diseñadores de SUDS deben evaluar las probables fuentes y características de los contaminantes potenciales y luego identificar los procesos de tratamiento apropiados para hacer frente a dichos contaminantes (Cuadro 4-2). Una vez identificados los procesos adecuados, el diseñador puede seleccionar el dispositivo o combinación de dispositivos de tratamiento convenientes.

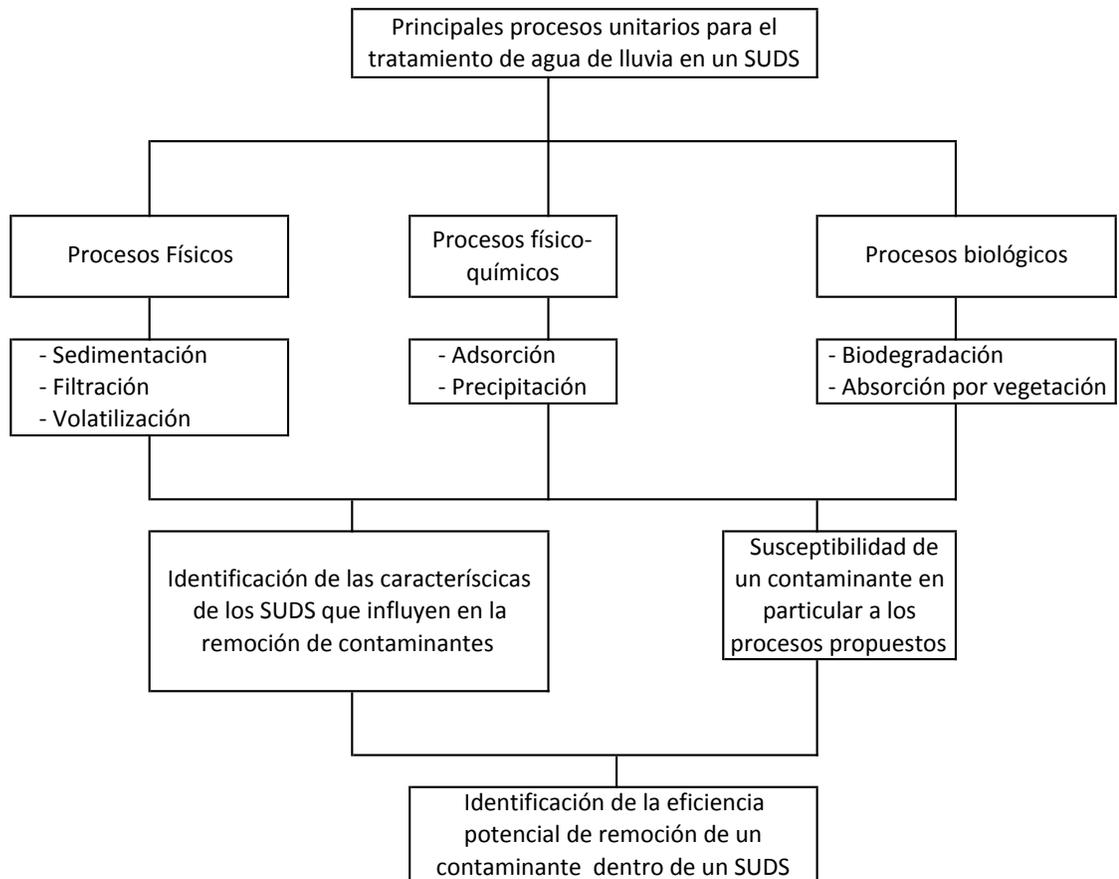


Figura 4-4 . Procesos unitarios para el tratamiento de agua de lluvia en un SUDS. Fuente: Adaptado de Parker 2010

Sedimentación

La sedimentación puede definirse como el proceso natural de remoción de las fases sólida y líquida de una suspensión por acción de la gravedad. Las características de sistemas como estanques de retención o humedales artificiales promueven la sedimentación, por lo que deben ser dimensionados adecuadamente para permitir que la velocidad de sedimentación se alcance. El tamaño y la densidad de la partícula determinan la rapidez con que ésta sedimentará (Parker, 2010).

Las partículas pueden encontrarse en el agua según tres estados de dispersión en función de su diámetro (Pérez, 2005) como partículas en suspensión, partículas coloidales y soluciones:

- Suspensiones, hasta diámetros de 10^{-4} cm.
- Coloides, con diámetros entre 10^{-4} y 10^{-6} cm.
- Soluciones, para diámetros menores a 10^{-6} cm.

Estos tres estados de dispersión dan lugar a tres procedimientos distintos para eliminar las impurezas. El primero, llamado sedimentación simple, está destinado a eliminar las partículas con diámetros mayores a 10^{-4} cm. Consiste en retirar los sólidos más pesados sin la necesidad de utilizar un tratamiento especial, únicamente dejando reposar el agua o disminuyendo su velocidad, entre mayor sea el tiempo de reposo, mayor será la sedimentación de partículas.

El segundo, denominado precipitación inducida, implica la aglutinación de los coloides a fin de formar un flóculo que se pueda sedimentar (Pérez, 2005). Ésta acción se logra agregando sustancias químicas con las que se logra la coagulación, la cual consiste en un proceso de desestabilización química que provoca que las partículas coloidales se agrupen para formar una partícula de mayor tamaño y peso, para que posteriormente se presente la sedimentación. Finalmente, el tercer proceso, esencialmente consiste en transformar en insolubles los compuestos solubles, aglutinarlos para formar el floculo y permitir así la sedimentación. Es decir que en muchos casos las partículas pueden ser, al menos en teoría, removidas mediante el proceso de sedimentación.

Las partículas en suspensión sedimentan en distintas formas dependiendo de sus características así como de su concentración. Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua éstas se depositan sin interferir, denominándose a este fenómeno *sedimentación libre*, en cambio, con altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija, ocurriendo un depósito masivo en lugar de individual, a este proceso se le llama *sedimentación interferida* (CEPIS, 1984).

El fenómeno de sedimentación de partículas en una suspensión diluida, puede describirse por medio de la mecánica clásica. En el primer caso, la sedimentación es solamente una función de las propiedades del fluido y las características de las partículas. Para el caso particular de sólidos discretos y esféricos, la velocidad de sedimentación esta dada por:

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{(\rho_s - \rho)}{C_A \rho}} D \quad (10)$$

donde: V_s = velocidad de sedimentación
 D = diámetro de la partícula
 g = aceleración de la gravedad
 ρ_s = densidad de la partícula
 ρ = densidad del fluido
 C_A = coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre es una función del número de Reynolds (Figura 4-5) y de la forma de las partículas, por lo que pueden presentarse tres casos generales:

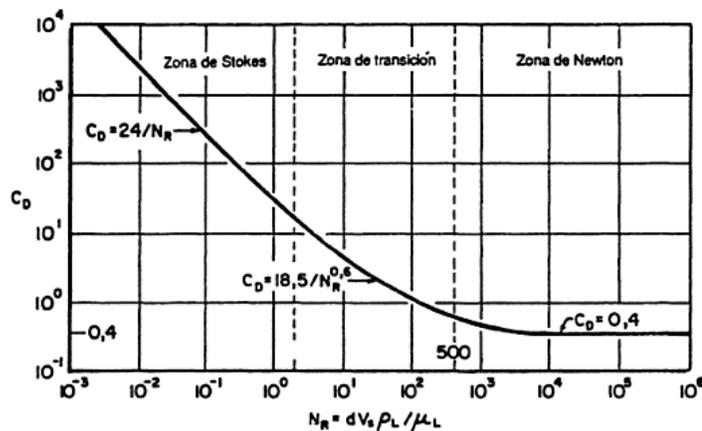


Figura 4-5. Relación entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds. Fuente: Ramalho 1996

→ Si el flujo es laminar, el valor del coeficiente de arrastre estará dado por:

$$C_A = \frac{24}{Re} \quad ; \quad \text{siendo} \quad Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

donde: Re = número de Reynolds
 v = velocidad característica del flujo
 μ = viscosidad dinámica

que remplazados en la ecuación (10) dan lugar a la llamada ecuación de *Stokes* (11), que permite evaluar la velocidad terminal de sedimentación de una micro partícula no coloidal, rígida, lisa, de forma esférica, en un fluido viscoso de tipo newtoniano, asumiendo un régimen de escurrimiento laminar sobre la esfera (Salinas, 2012).

$$V_s = \frac{g(\rho_s - \rho)D^2}{18 \cdot \mu} \tag{11}$$

- Si se presenta flujo turbulento el valor del coeficiente de arrastre será: $C_A = 0.4$
- Por último, si se presenta flujo en transición el valor de C_A será variable, y estará determinado, según su autor, por alguna de las ecuaciones presentadas en el Cuadro 4-1.

Cuadro 4-1. Valores del coeficiente de arrastre.

Autor	Expresión
Rich	$C_A = \frac{18.5}{Re^{0.60}}$
Hatch	$C_A = \frac{14}{Re^{0.5}}$
Allen	$C_A = \frac{12.65}{Re^{0.5}}$
Fair-Geyer-Okun	$C_A = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34$
Schiller-Newman	$C_A = \frac{12}{Re} (1 + 0.14Re^{0.687})$
Goldstein	$C_A = \frac{12}{Re} + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1280}Re^2 + \frac{71}{20480}Re^3$

Fuente: CEPIS 1984

En cambio, en la sedimentación interferida, las partículas se encuentran a distancias tan reducidas, que el liquido desplazado es confinado, aumentando de velocidad conforme interfiere en los campos situados alrededor de las partículas individuales, por lo que el flujo no sigue líneas paralelas, sino trayectorias irregulares, produciendo un fenómeno similar al que se produce durante el retrolavado de un filtro (CEPIS, 1984).

Bajo estas condiciones la velocidad de sedimentación se determina con la expresión:

$$V_I = 5.45 \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} \frac{P^2}{(1 - P)} \psi^2 D^2 \quad (12)$$

donde: ψ = factor de forma de la partícula
 P = porosidad
 μ = viscosidad dinámica

o bien, de forma aproximada mediante:

$$V_I = \frac{V_s}{P^4} \quad (13)$$

Filtración

La filtración es el tamizado físico del agua que elimina partículas contaminantes a medida que pasan a través de un medio poroso o barrera hidráulica. Por lo anterior, la filtración se considera como el mecanismo de tratamiento más eficaz en sistemas de superficies permeables, aunque es también es un mecanismo de remoción importante para los sistemas de retención. En tiempos recientes se han realizado investigaciones para refinar las especificaciones de los medios filtrantes con la finalidad de mejorar la eliminación de contaminantes (Parker, 2010).

Usualmente la filtración es considerada como el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: transporte y adherencia. Inicialmente, las partículas a remover son transportadas de la suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante, donde permanecerán adheridas siempre que resistan la acción de las fuerzas cortantes debidas a las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento.

El transporte de partículas es un fenómeno físico e hidráulico, regido principalmente por los parámetros que gobiernan la transferencia de masas y en el que intervienen los procesos de: cernido, sedimentación, intercepción y difusión. La adherencia entre partículas y medios filtrantes es básicamente un fenómeno de acción superficial, que es influenciado por parámetros tanto físicos como químicos entre los que se encuentran las fuerzas de Van der Waals, fuerzas electroquímicas y el puente químico.

A medida que se desarrolla el proceso de filtración, las partículas sólidas retenidas sobre el medio filtrante van formando un lecho poroso, a través del cual debe circular el fluido, llamado *Torta filtrante*, que aumenta de espesor con el tiempo, por lo que la resistencia al paso del fluido también aumenta, dando lugar a las siguientes formas de filtración:

- Filtración a presión constante
- Filtración a caudal constante

La teoría de la filtración convencional se deriva de los estudios de mecánica de fluidos en medios porosos. La ecuación que describe el movimiento de fluidos newtonianos a través de medios porosos, fue formulada en 1856 por el Ingeniero Francés Henry D'Arcy. Considerando el caso particular donde se desprecian los efectos gravitacionales, esta ecuación puede expresarse de la siguiente manera:

$$v = \frac{k\Delta P}{\mu l} \quad (14)$$

donde: v = velocidad superficial del líquido (L/t)
 k = permeabilidad del lecho (L²)
 μ = viscosidad del fluido (M/L-t)
 ΔP = diferencia de presión entre la entrada y salida del filtro
 l = espesor del lecho filtrante (L)

Mientras que la velocidad de filtración puede ser descrita en términos del volumen filtrado y el área de filtración como:

$$v = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (15)$$

Adicionalmente, si la *Torta filtrante* es considerada incompresible, es decir, que la resistencia al flujo no se ve alterada de forma apreciable por la diferencia de presión o por la velocidad de deposición del material, entonces el valor de la porosidad del lecho puede considerarse constante y las ecuaciones (14) y (15) pueden reescribirse como :

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{r\mu} \quad (16)$$

obteniéndose la ecuación diferencial básica de la filtración convencional, que expresa la relación l/k como la resistencia específica del medio filtrante r .

Habitualmente, las partículas que forman la *Torta filtrante* son pequeñas y la velocidad de filtrado a través del lecho es baja, de forma que generalmente se tiene un flujo laminar, por lo tanto la ecuación (16) puede modificarse mediante la ecuación de Kozeny:

$$v_0 = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\varepsilon^3}{5(1-\varepsilon)^2 S^2} \frac{\Delta P}{\mu l} \quad (17)$$

donde: v_0 = velocidad superficial de filtrado relativo al área total de la superficie filtrante

V = volumen de filtrado

ε = porosidad del lecho

μ = viscosidad del fluido

ΔP = diferencia de presión entre la entrada y salida del filtro

l = espesor de la torta filtrante

A = área de la sección transversal de la torta filtrante

S = Superficie específica de las partículas por unidad de volumen

Volatilización

La volatilización se refiere a la transferencia de un compuesto de una solución acuosa a la atmósfera del suelo y luego a la atmósfera general. La conversión a un gas o vapor se produce debido al aumento de temperatura, reducción de presión, reacciones químicas o una combinación de estos procesos. La velocidad de volatilización de un compuesto es controlada por muchas de sus propiedades y las del suelo circundante. En los esquemas de SUDS la volatilización se ocupa principalmente de compuestos orgánicos en productos derivados del petróleo y pesticidas.

La volatilización depende de la exposición de la superficie a la atmósfera y se ve incrementa por los espacios abiertos dentro del dispositivo de tratamiento, el aumento del viento, temperatura ambiental y condiciones de turbulencia en el agua (Parker, 2010).

Adsorción

La adsorción, aunque no es un mecanismo común utilizado por los SUDS para el tratamiento de las aguas pluviales, puede ocurrir en sistemas de infiltración en los que los suelos subyacentes contienen cantidades apreciables de arcilla. De este modo, los contaminantes disueltos se unen a las partículas del medio filtrante a medida que los escurrimientos se infiltran en el suelo (EPA, 1999).

De forma general, se puede definir la adsorción como un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase normalmente líquida y se concentra sobre la superficie de otra fase, generalmente sólida. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama *adsorbato* y la fase en la cual se concentra se llama *adsorbente*. Un parámetro de especial importancia en el diseño de sistemas de eliminación de contaminantes mediante adsorción es la capacidad del adsorbente, la cual depende de muchos factores. En primer lugar se encuentran las propiedades del adsorbato tales como su geometría, tamaño molecular y polaridad. En segundo lugar se pueden citar las condiciones de la disolución tales como el pH, temperatura y concentración de los contaminantes (Sotelo et al., 2001).

El mecanismo de adsorción es importante para la eliminación de metales pesados que se adhieren a la materia orgánica y al medio filtrante a través de los cuales pasa el agua. Sin embargo, debido a la rápida infiltración del agua a través de los sistemas de filtración, las partículas en solución y los contaminantes más finos son capaces de pasar a través del sistema. El tipo de medio filtrante tiene una influencia significativa en la capacidad de adsorción, por ejemplo, la arena ofrece sitios de absorción limitados a los que los contaminantes pueden adherirse, mientras que materiales como limo y arcilla ofrecen un alto número de sitios de adsorción, y pueden capturar contaminantes asociados con tamaños de partícula más pequeños (Parker, 2010).

Precipitación

Este proceso es el mecanismo más común para la eliminación de metales solubles. El proceso de precipitación implica reacciones químicas entre los contaminantes y el suelo o medio filtrante que transforman los componentes de una solución para formar una suspensión de partículas insolubles. Los metales se precipitan como hidróxidos, sulfuros y carbonatos dependiendo de los elementos presentes y el nivel de pH. La precipitación puede eliminar la mayoría de los metales como arsénico, cadmio, cromo III, cobre, hierro, plomo, mercurio, níquel, zinc y muchas especies aniónicas tales como fosfatos, sulfatos, fluoruros (Woods-Ballard et al., 2007). Los metales disueltos forman precipitados y se depositan fuera de la solución en función de la temperatura y la composición química del agua, principalmente pH y oxígeno disuelto.

Biodegradación

Además de los procesos físicos y químicos que tienen lugar en los SUDS, también puede existir tratamiento biológico o biodegradación. Éste proceso consiste en la descomposición de los elementos orgánicos mediante reacciones bioquímicas potenciadas por ciertas enzimas. La velocidad de biodegradación dependerá del tipo de microorganismos, de las características del suelo y de la estructura molecular del contaminante. Las comunidades microbianas pueden establecerse dentro del sistema (medio filtrante), utilizando el oxígeno dentro de los materiales de construcción y los nutrientes que se suministran con los flujos de entrada, para degradar contaminantes orgánicos, como aceites y grasas. El nivel de actividad de tal proceso se verá afectado por las condiciones ambientales, como la temperatura y el suministro de oxígeno y nutrientes. También depende de las condiciones físicas dentro del sistema, como la capacidad de los materiales para el crecimiento microbiano.

Absorción por vegetación

En los estanques de retención y humedales, la absorción por vegetación representa un importante mecanismo para la eliminación de nutrientes como fósforo y nitrógeno. La vegetación puede también propiciar las condiciones adecuadas para la remoción de metales, por ejemplo, los sulfuros en la zona de la raíz, aunque se requiere mantenimiento intermitente para eliminar las plantas ya que de otra manera los metales serán devueltos al agua cuando las plantas mueran. Las plantas contribuyen a la eliminación de los contaminantes de las aguas pluviales y apoyan los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar en el sistema. Generalmente, la densidad y las especies de plantas seleccionadas determinarán la efectividad de eliminación (Woods-Ballard et al., 2007 y Parker, 2010).

Cuadro 4-2. Relación de contaminantes y mecanismos de eliminación recomendados.

<u>Contaminantes</u>	<u>Mecanismos de eliminación</u>
Nutrientes Fósforo, nitrógeno	Sedimentación, biodegradación, precipitación, desnitrificación.
Sedimentos Sólidos suspendidos totales	Sedimentación, filtración
Hidrocarburos TPH, PAH, VOC, MTBE	Biodegradación, filtración y adsorción.
Metales Plomo, cobre, cadmio, mercurio, zinc, cromo, aluminio	Sedimentación, adsorción, filtración, precipitación, vegetación.
Pesticidas	Biodegradación, adsorción, volatilización.
Cloruros	Prevención.
Cianuros	Volatilización.
Materia orgánica, DBO	Filtración, sedimentación, biodegradación.

Fuente: Adaptado de Woods-Ballard et al. 2007

4.4 Limitaciones

Ningún tipo de SUDS puede abordar todos los problemas relacionados con los escurrimientos pluviales. Cada tipo tiene ciertas limitaciones basadas en el área de drenaje, espacio de tierra disponible, el costo y la eficiencia de remoción de contaminantes. La mayoría de los SUDS tienen limitaciones para su aplicación. Algunas consideraciones para incorporar en la selección de un SUDS son:

- Área de drenaje;
- Usos de suelo;
- Frecuencia media de la precipitación, duración e intensidad;
- Volúmenes de escurrimiento y gastos;
- Tipos de suelo;
- Geología y topografía;
- Disponibilidad de tierras;
- Desarrollo futuro;
- Profundidad del nivel freático;
- Seguridad y la aceptación de la comunidad;
- Accesibilidad de mantenimiento;
- La necesidad de mantenimiento.

Además de las condiciones físicas e hidrológicas particulares de cada sitio, factores como el costo, regulaciones locales, estética, la experiencia de un desarrollador o contratista con un diseño particular, así como las características de los cuerpos receptores, tales como los niveles de temperatura y nutrientes, pueden limitar la aplicación de los SUDS. La combinación de estos factores hacen que la selección de un sistema apropiado sea una tarea difícil, y que debe ser realizada únicamente por un profesional experimentado en la gestión de aguas pluviales. Esto es especialmente cierto en áreas urbanas de gran tamaño, donde se necesita conocimiento de los factores locales que afectan tanto el diseño como el rendimiento. Los SUDS usados en climas áridos y semiáridos también presenta limitaciones únicas. La disponibilidad de agua para soportar la vegetación y mantener el nivel necesario en SUDS tales como estanques de retención y humedales es la principal limitación en estas áreas, sin las fuentes de agua adecuadas, estos sistemas no pueden funcionar correctamente y pueden convertirse en estorbos públicos. Igualmente, el uso de SUDS en climas fríos pueden necesitar modificaciones de diseño para adecuarse a los procesos de congelación y deshielo.

Los SUDS requieren una variedad de actividades de mantenimiento periódicas con el fin de mantener su rendimiento. Es necesario además de la eliminación de sedimentos y el mantenimiento de vegetación, la reparación de estructuras de entrada y salida, y el reemplazo periódico de los medios de filtración por nombrar algunos. El programa de mantenimiento real varía considerablemente entre sistemas y depende de las condiciones específicas del lugar (EPA, 1999).

4.4.1 Criterios de selección

Distintos componentes SUDS pueden utilizarse en un sitio específico que tendrá características únicas que deben guiar la selección del sistema o conjunto de sistemas más adecuado. No todas las técnicas SUDS serán apropiadas para todos los sitios, por lo tanto, es importante identificar las oportunidades y limitaciones en una fase temprana del proceso de diseño (Woods-Ballard et al., 2007). La selección del sistema de drenaje adecuado es un proceso complejo (Figura 4-6), ya que son muchos los factores que deben considerarse al momento de elegir el SUDS o conjunto de SUDS adecuados para un área determinada. Es pertinente destacar que los SUDS deben ser incorporados en un programa integral de gestión de aguas pluviales, ya que sin la adecuada planificación, selección, diseño, construcción y mantenimiento, los SUDS no serán eficaces en el manejo de los escurrimientos urbanos.

Los SUDS seleccionados pueden adaptarse para hacer frente a las diversas fuentes de escurrimientos producidos en las áreas urbanizadas. Por ejemplo, un conjunto particular de SUDS puede ser utilizado en nuevos desarrollos urbanos y obras en construcción, donde existen oportunidades para la incorporación de sistemas que se centran en la prevención de la generación de escurrimientos, reduciendo las superficies impermeables y el mantenimiento de los patrones naturales de drenaje. Por otro lado en los asentamientos urbanos ya establecidos, un conjunto diferente de SUDS puede ser más apropiado, debido a limitaciones de espacio. En estas áreas, los SUDS se pueden seleccionar para centrarse en las prácticas de prevención de la contaminación (EPA, 1999).

Al seleccionar un SUDS la pregunta más importante que se debe responder es ¿Qué problema específico está abordando el SUDS? Si su principal propósito es la eliminación de metales disueltos, un dispositivo tal como un dren filtrante posiblemente no será adecuado, mientras que un humedal de aguas pluviales tiene el potencial de ser más eficaz en la eliminación de contaminantes. Por lo que los objetivos de los SUDS deben estar claramente definidos desde el principio y el sitio estudiado detalladamente para que coincida con el sistema. Los objetivos deben incluir el grado requerido de cantidad y calidad.

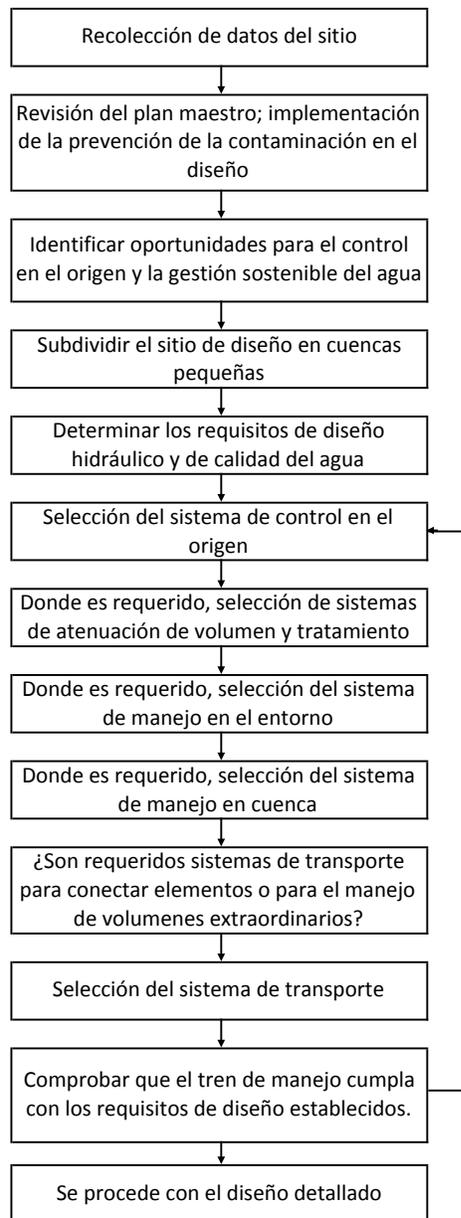


Figura 4- 6. Diagrama de flujo del proceso de selección SUDS. Fuente: Adaptado de Woods-Ballard et al. 2007

Con la finalidad de simplificar el proceso de diseño, los distintos factores que intervienen en la selección del SUDS o conjunto de SUDS adecuados para un lugar pueden agruparse, según algunos investigadores (Woods-Ballard et al., 2007) en los siguientes cinco criterios:

1. Características del uso de suelo: Es importante determinar que SUDS es el más adecuado para el uso de suelo propuesto del área de drenaje del sistema. Los diferentes tipos de uso de suelo tendrán diferentes características en cuanto a cantidad y tipo de contaminantes.

2. Características del sitio: Es importante determinar si existen características del lugar que puedan restringir o impedir el uso de una técnica de SUDS particular. Las características del lugar que pueden influir en la selección SUDS pueden ser: tipo de suelo, profundidad del nivel freático, área de drenaje para un elemento específico, espacio, etc.
3. Características de la cuenca: Es importante determinar si existen criterios normativos que puedan restringir o impedir el uso de un SUDS particular, o que puedan imponer requisitos adicionales sobre el rendimiento del sistema. El diseño de los SUDS puede por ejemplo estar influenciado por las características de los cuerpos de agua receptores de la descarga de aguas pluviales. En algunos casos, se necesitará alta remoción de contaminantes para proteger plenamente los recursos acuáticos y la salud humana.
4. Requerimientos cuantitativos y cualitativos: El volumen de agua que debe recibir tratamiento para mejorar su calidad puede manejarse con una sola técnica SUDS o una serie de técnicas, que forman parte de un tren de tratamiento. Cada técnica tiene una eficacia de eliminación diferente para cada contaminante a remover. Sin embargo para la mayoría de los sitios es necesario mejorar la calidad del agua en general en toda la gama de contaminantes urbanos. Cuando existan contaminantes de particular interés, las técnicas seleccionadas deben ser adecuadas para su remoción a niveles aceptables.

El control de volumen significativo sólo será posible mediante el uso de sistemas de infiltración, aunque la detención extendida y la retención puede promover pérdidas significativas a través de la evaporación. Algunos sistemas no son apropiados para controlar eventos de inundación extremas, por ejemplo, los sistemas de infiltración serán diseñados para un caudal determinado, por lo que grandes volúmenes pueden deteriorar su rendimiento operativo, en tales casos, el excedente debe ser desviado hacia otra técnica de SUDS.

5. Requerimientos ambientales y de esparcimiento: Es importante determinar si los componentes SUDS propuestos cumplen con todos los requisitos de la comunidad y el medio ambiente. Las adaptaciones de las propuestas de solución que pueden mejorar los beneficios estéticos del sistema también deben ser consideradas.

CAPÍTULO 5

Estado del arte

La identificación de una variedad de experiencias exitosas pero aisladas y fragmentadas a nivel local e internacional, permiten destacar el potencial de la administración sostenible del agua de lluvia, siendo esta una opción para acceder al agua potable y a alternativas sostenibles de saneamiento. De éste modo, el uso planificado de la lluvia debería garantizar la soberanía alimentaria, la recarga de acuíferos, la reducción de desastres naturales así como la supervivencia de ecosistemas estratégicos (Pacheco, 2008).

Si bien los sistemas de administración sostenible de los escurrimientos superficiales han sido utilizados desde hace tiempo en muchas ciudades alrededor del mundo, los criterios de diseño utilizados, los costos, los beneficios, los efectos y las limitaciones han sido debidamente documentados solo en épocas recientes, por lo que una evaluación de esta naturaleza podría permitir su desarrollo a mayor escala (GWP, 2011). Asimismo, se ha prestado poca atención a la optimización de éstos sistemas para mejorar los beneficios hidráulicos y la eficiencia de remoción de contaminantes para alcanzar los estándares de calidad y cantidad establecidos.

Por esa razón, el intercambio internacional de conocimientos es una parte esencial para dar a conocer el funcionamiento de los SUDS en países y circunstancias diferentes. Por ejemplo, países como el Reino Unido, Noruega, Alemania y los Países Bajos, intercambian experiencias en SUDS mediante actividades internacionales, como talleres, conferencias, excursiones, rotación de puestos, etc. (Boogaard, Blanksby & Jefferies, 2012). Con el propósito de mostrar un panorama general en el uso de SUDS, el presente capítulo describe experiencias exitosas alrededor del mundo y en México, aunque cabe destacar la existencia de fracasos comunes en diseño, construcción y mantenimiento en varios países.

5.1 Experiencias en el mundo

Los SUDS han sido utilizados en muchos países, como Estados Unidos, Suecia y Australia por muchos años, aunque el enfoque global de gestión de la cantidad y calidad del agua de lluvia es relativamente nuevo (Boogaard, Blanksby & Jefferies, 2012). El uso de técnicas SUDS está cada vez más extendido en el mundo, en países como Japón, Alemania, Francia, España, Sudáfrica, Nueva Zelanda, entre otros, se han realizado multitud de proyectos, y las experiencias recogidas han dado lugar a la aparición de manuales de diseño, guías, normativa, legislación y documentación de todo tipo, en muchos casos, disponible en la red para facilitar su divulgación (Perales, 2008 y Perales & Andrés-Doménech, 2007).

Europa

El uso de las diferentes técnicas SUDS está más extendido en los países del centro y norte de Europa que en la zona sur, donde países como España, Italia, Grecia y Portugal cuentan todavía con escasas experiencias. En ciudades como Berlín y Ginebra, existe legislación para la captación en techos y uso de escurrimientos para prevenir inundaciones. Estas normas contribuyen al uso y reuso del agua y a la reducción de volúmenes de desechos líquidos. En Suiza, ejemplos prácticos (Oficina Federal del Ambiente, 2000) muestran como la infiltración, la retención y el drenaje superficial, permiten la recarga de acuíferos y la prevención de inundaciones. En Ginebra, existen ejemplos como humedales artificiales, techos y jardines-terraza adaptados para retener la lluvia, y una legislación sobre el uso de la misma para la prevención de inundaciones, el mantenimiento de los espacios públicos y el lavado de calles en la ciudad. Sin embargo, Inglaterra es probablemente el país más avanzado en cuanto a investigación, desarrollo y aplicación de SUDS. En este país, las universidades y las empresas trabajan juntos para desarrollar mejores técnicas de drenaje sostenible (Pacheco, 2008 y Poleto, 2011).

Como ejemplo se puede mencionar el proyecto *Porte des Alpes*, en Lyon Francia, que es un área especializada en proyectos relacionados a la sostenibilidad urbana, que se encuentra al este, en los suburbios de la zona urbana de Lyon. Durante la planeación del parque tecnológico en St. Priest se adoptaron técnicas SUDS para dar respuesta a las diferentes condiciones del lugar, entre ellos la falta de una salida natural de drenaje. De este modo, se combinaron soluciones como cunetas verdes, drenes filtrantes, estanques de retención y depósitos de infiltración que constituyen el punto final del sistema. Las instalaciones están abiertas al público permitiendo el desarrollo de actividades educativas,

recreativas y deportivas. El bienestar de los trabajadores del parque fue considerado durante el proceso de diseño, obteniendo como resultado un entorno agradable de trabajo. Asimismo, el recinto recibe múltiples visitas tanto de grupos escolares como de profesionales interesados en el desarrollo de estas técnicas (Perales & Andrés-Doménech, 2007).



Figura 5-1. Parque tecnológico de St. Priest, Lyon Francia. Fuente: aecom.com

Por otro lado, en Dinamarca se creó un sistema de drenaje sostenible original diseñado por la compañía Nordarch, que incluye dos funciones, la primera y la más importante es combatir el exceso de agua en la ciudad de Roskilde, y la segunda, brindar un espacio recreativo exclusivo para los patinadores. El parque nombrado Rabalder es un espacio que protege una nueva zona urbana de las inundaciones resultantes de lluvias repentinas y puede contener 23 000 m³ de agua de lluvia. Dado que la zona es propensa a inundaciones severas sólo pocas veces al año, se pensó que sería una mala alternativa cubrir el paisaje con un sistema de drenaje, pero no proporcionarlo habría resultado catastrófico, ya que la zona representa un importante barrio residencial y comercial, por lo que idealmente la solución se centra tanto en las personas, como en la mitigación de desastres (INDEX, 2013).

El diseño incluye un sistema de drenaje de alta resistencia que sirve al mismo tiempo como un centro de recreación para los patinadores. Todo el complejo, que incluye un parque de patinaje, zona de fitness, ciclovías, máquinas de ejercicios, espacios para el descanso y miradores, está totalmente integrado en el sistema de canales que se extienden a través de una serie de colinas que transportan el agua de lluvia hacia un lago adyacente.



Figura 5-2. Parque Rabalder de Roskilde, Dinamarca. Fuente:designtoimprovelife.dk

Como último ejemplo del uso de SUDS en Europa, se puede mencionar el proyecto en Augustenborg, un suburbio muy poblado del centro de la ciudad de Malmö, Suecia, que en un esfuerzo por resolver problemas de inundaciones causadas por el desbordamiento del antiguo sistema de drenaje al no poder hacer frente a la combinación de los escurrimientos pluviales y a la aportación de las aguas residuales domésticas, se propuso desconectar el drenaje pluvial de la red de alcantarillado combinado existente y drenar los escurrimientos por medio de un sistema abierto. El sistema que está en funcionamiento a partir del año 2001, abordó éstas problemáticas a través de una compleja disposición de techos verdes, canales, estanques y pequeños humedales artificiales (Kazmierczak & Carter, 2010). El proyecto ha dado como resultado una disminución significativa de las tasa de escurrimiento del agua de lluvia, los techos verdes resultaron eficaces en la reducción de los escurrimientos totales y los estanques atenúan con éxito los flujos máximos de una tormenta para una vida útil estimada en 10 años, adicionalmente, el aumento de los espacios verdes ha mejorado la imagen de la zona.



Figura 5-3. Sistema de canales y estanques en Augustenborg, Suecia. Fuente: archi-europe.com

Estados Unidos

En los Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) regula la normativa relativa a la contaminación de las aguas pluviales a nivel federal. A nivel estatal, cada sitio desarrolla su propia reglamentación, que debe ser compatible con las normas establecidas por la EPA.

De acuerdo con Poletto (2011), en los Estados Unidos se han empleado por muchos años prácticas de desarrollo urbano de bajo impacto (LID), siendo Maryland uno de los primeros estados en exigir el control de pequeños volúmenes de escurrimientos usando sistemas de detención y para finales de 1970 también fue el primero en exigir SUDS para el control de la calidad de las aguas pluviales (Dublin City Council, 2005).

Hoy en día la planificación urbana para los SUDS en los Estados Unidos es una realidad regida por guías locales, tales como las propuestas por la oficina de servicios ambientales de Portland en 1999, el Condado de Prince George en 2002 y el Condado de Sarasota de 2004. En relación con los lugares de aplicación de sistemas de drenaje sostenible incluyen las ciudades de Orlando, Florida, Austin, Texas, Portland, en Oregon y Seattle, en el estado de Washington, entre otras, teniendo buenos resultados financieros y ambientales para los nuevos desarrollos urbanos.

Ideas innovadoras también se han desarrollado en los EE.UU., tales como el uso de sistemas de bioretención. Una variedad de SUDS se han instalado desde grandes estructuras de concreto a estanques estéticamente agradables. Adicionalmente, una serie de iniciativas se han puesto en marcha para educar al público en general sobre la importancia de la gestión sostenible del agua de lluvia (Dublin City Council, 2005).

Como ejemplo de lo anterior se puede mencionar el proyecto del Aeropuerto Internacional Stewart de Nueva York, para el cual se instaló, en el año 2010, cerca de 24,000 m² de asfalto permeable en la zona de estacionamientos, con el objetivo de ampliar la capacidad existente y promover la infiltración del agua de lluvia. El sitio perteneciente a la Autoridad Portuaria de Nueva York y Nueva Jersey, que ha puesto en marcha numerosas prácticas de gestión de las aguas pluviales en sus instalaciones, utilizó también cunetas verdes, zanjas de infiltración y un gran depósito de almacenamiento subterráneo. Parte de los escurrimientos se recogen y se utilizan para el sistema de riego mediante bombas alimentadas por energía solar (Department of Environmental Conservation, 2014).



Figura 5-4. Aeropuerto Internacional Stewart de Nueva York. Fuente:lh4.ggph.com

Australia

La ciudad de Melbourne en Australia es uno de los laboratorios más importantes de implantación de proyectos de SUDS a nivel mundial. Actualmente están en marcha estrategias de diseño urbano que tienen como objetivo imitar el flujo natural gestionando los escurrimientos cerca del sitio de precipitación y acercando el curso del agua a la sociedad en comparación con el uso de tuberías y canales tradicionales (Souza, 2005; citado en Poletto, 2011). A lo largo de todo el territorio, tanto la iniciativa privada como el sector público, han apoyado este tipo de estrategias con la finalidad de obtener un mejor y más sostenible uso de los recursos hídricos. Más aún, estas estrategias se han visto favorecidas debido a que tanto su tamaño como la inversión que requieren son relativamente pequeñas, por lo que estas acciones han sido replicadas en diversas zonas de la ciudad.

Un ejemplo claro es la reconstrucción de la avenida Alleyne en una calle con una secuencia de sistemas de drenaje que corren paralelos a la misma con el objetivo de mitigar las problemáticas relativas a los escurrimientos en la zona. Para este efecto, el ancho de la calle se redujo de 7 a 5 metros, dando cabida a jardines y a una serie de espacios de estacionamiento que se van alternando a lo largo de la vialidad. Los escurrimientos son entonces dirigidos a través de pendientes hacia estos espacios verdes que se encargan de filtrar y conducir el agua pluvial hacia un depósito (Perló, 2013). Sobre la base de la experiencia adquirida en la aplicación de principios de diseño sostenible, la ciudad de Melbourne promueve los últimos avances en tecnología de construcción urbana. Los escurrimientos pluviales generados a partir de superficies impermeables se tratan cerca de su fuente utilizando una variedad de formas y tamaños de elementos estructurales, entonces el efluente tratado se conduce a las instalaciones de almacenamiento debajo de la superficie y se utiliza para el riego de cuatro hectáreas de áreas verdes.



Figura 5-5. SUDS en Dockland Park, Melbourne Australia. Fuente: aecom.com

América Latina

En Latinoamérica, también son diversas las experiencias en sistemas de manejo de escurrimientos pluviales instaurados en tiempos recientes, ciudades como Santiago de Chile y Bogotá han optado por soluciones innovadoras para solucionar sus problemáticas relacionadas con el agua de lluvia.

La ciudad de Curitiba en Brasil es reconocida por su innovación y puesta en marcha de una serie de estrategias urbanas encaminadas al desarrollo sostenible en cuanto a movilidad, espacios públicos y manejo del agua. Como gran parte de las grandes ciudades en Latinoamérica, ésta se ha visto sometida a un importante crecimiento urbano en un periodo de tiempo bastante corto.

En lo relativo a la gestión del agua, la estrategia utilizada consistió en darle al líquido el espacio necesario para transitar y al tratarse de una ciudad atravesada por varios ríos y canales, se tomó la decisión de dejar un área de amortiguamiento a lo largo de los mismos de tal manera que de suscitarse crecidas, éstas se dieran sobre áreas verdes de tal forma que la ciudad no se viera afectada por inundaciones. De esta manera, el río Iguazú cuenta con un enorme parque inundable mientras transcurre por la ciudad, en cambio, los arroyos urbanos se manejan por medio de cunetas verdes que además recolectan el agua pluvial y hacen más agradable el entorno. Es importante destacar que, aunque dichos planes contienen principios ambientales similares, están lejos de encajar en un modelo ideal de drenaje de agua de lluvia, según lo propuesto por los SUDS (Perló, 2013 & Poletto, 2011).



Figura 5-6. Ciudad de Curitiba en Brasil. Fuente:eadic.com

5.2 En México

En México pueden encontrarse múltiples ejemplos de proyectos individuales de infraestructura urbana destinados a la gestión de los escurrimientos superficiales, y aunque aún no se cuenta con medidas específicas referidas a prácticas de SUDS, si existen iniciativas cercanas ligadas al concepto de infraestructura verde.

La infraestructura verde en el ámbito urbano es ante todo una forma eficiente de aplicar los recursos públicos y privados en la búsqueda de soluciones a problemáticas y riesgos ambientales. Éste modelo considera acciones no solamente de protección sino de restauración del ecosistema original y convivencia ciudadana, desarrollando múltiples iniciativas y prototipos de permeabilidad, mejoramiento del espacio público, sensibilización y adecuación de la infraestructura convencional. La infraestructura verde aborda desde un enfoque integral las problemáticas que originalmente se tratan de forma aislada, tanto en lo técnico como en lo administrativo (Suárez et al., 2011). Lo esencial en la infraestructura verde es la integración del conocimiento para mejorar el espacio público y conservar los ecosistemas a través de tecnologías nuevas y existentes, que en su conjunto dan solución a múltiples problemas ambientales.

Como ejemplo se tiene el proyecto de investigación titulado *Planta Piloto* que cuenta con dos plantas prototipo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, una de flujo vertical instalada en la Zona Cultural de la Ciudad Universitaria y otra de flujo horizontal en el Parque Nacional Viveros de Coyoacán, en la zona sur de la Ciudad de México construido en 1998 con una superficie de 75 m², en la que se tratan 5.6 m³ de aguas residuales de tipo urbano por día (Boletín UNAM-DGCS, 2002).



Figura 5-7. Humedal artificial, viveros de Coyoacán. Fuente: cibernetica.ccadet.unam.mx

Otro ejemplo es el proyecto de construcción de azoteas verdes en inmuebles del Gobierno del Distrito Federal conducido por la Dirección General de Bosques Urbanos y Educación Ambiental (Hinojosa, 2014). Como parte de este proyecto, en el año 2011 se construyó la azotea verde habitable más grande de Latinoamérica con 2,500 m² que se encuentra en el edificio del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), en la Ciudad de México, el cual fue transformado en una estructura sostenible. Las modificaciones que sufrió repercutieron notablemente en el ahorro de energía, ya que después de la implementación del techo verde se generó un ahorro de más del 64% en todo el edificio, otros beneficios fueron el incremento en el valor del inmueble y la creación de un espacio de convivencia para todos sus trabajadores (García de alba, 2012). En este caso el INFONAVIT requería un sistema de naturación en sus instalaciones, para lo cual solicitó un proyecto de azotea verde con la finalidad de fomentar una conciencia ecológica entre sus empleados y público en general; para ello, se eligió un sistema de cubierta vegetada integral que incluyera una impermeabilización de alto desempeño y que permitiera también la colocación de áreas ajardinadas y zonas de recreo en él. Asimismo fue necesario contar con un sistema de drenaje eficiente que permita la salida del agua durante la época de lluvia.



Figura 5-8. Azotea verde del edificio del INFONAVIT. Fuente: eluniversal.com

5.3 Caso de estudio

Infraestructura verde en los pedregales, zona sur de la Ciudad de México

El proyecto llamado: *El Pedregal de San Ángel de la Ciudad de México: ecología urbana de la UNAM, REPSA*, desarrollado por la Facultad de Arquitectura de la UNAM a través de la licenciatura en Arquitectura de Paisaje, en coordinación con el Instituto de Biología y la Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, y financiado por el Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF), tiene como objetivo diseñar las redes de infraestructura verde al sur de la ciudad, en las tres delegaciones políticas ubicadas en la zona de pedregales: Tlalpan, Coyoacán y Álvaro Obregón, producto del derrame de lava del volcán Xitle, y que es una zona que se encuentra actualmente superpoblada (Camarena, 2012).

Esta reserva protegida por la UNAM desde el año 1983, ha funcionado como un pequeño laboratorio urbano en el cual se puede experimentar y probar diferentes prototipos para mejorar la calidad de vida y a la vez conservar el entorno natural, lo que, como señalan Lot, Camarena & Suárez (2013) permitirá a largo plazo el establecimiento de una nueva interacción entre el hombre y la naturaleza en un entorno social y ambiental complejo.

Localización

El pedregal de San Ángel es una gran extensión de lava volcánica que cubre un total de 70 km² al sur poniente de la cuenca de México. Este particular derrame abarca un área que Suárez et al. (2011), define de la siguiente manera (Figura 5-9): el origen del derrame se encuentra al sur en las faldas del Ajusco, al norte limita con los antiguos asentamientos de San Ángel, Chimalistac y Coyoacán. En el oriente colinda con el Ejido de Huipulco, San Antonio Tomatlán y Coapa; la conurbación del centro de Tlalpan y Sta. Úrsula que sube hacia los poblados de San Pedro Mártir y San Andrés Totoltepec. Y por último, en el poniente limita con el poblado de San Nicolás Totolpan, Contreras, Sta. Teresa y los ríos Eslava, Viborillas y Magdalena, en las delegaciones de Tlalpan, Magdalena Contreras y Álvaro Obregón.

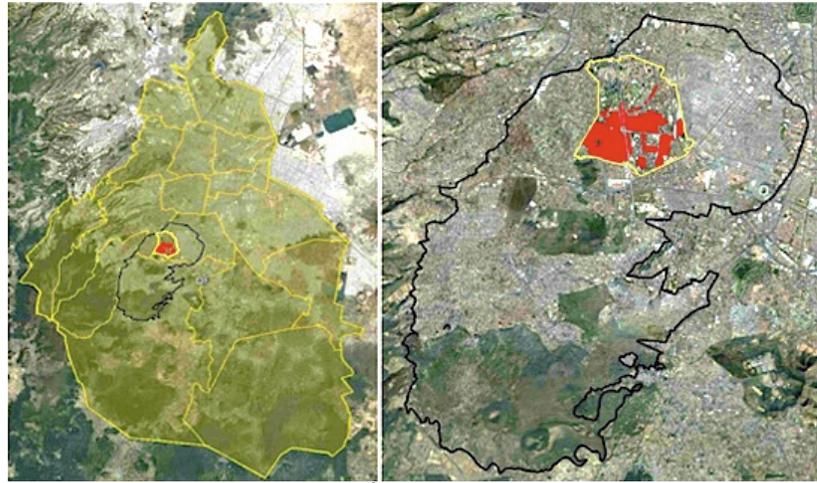


Figura 5-9. Distrito Federal (verde), el Pedregal de San Ángel (negro), Ciudad Universitaria (amarillo) y la REPSA (rojo).
Fuente: repsa.unam.mx

Descripción

El denominado proyecto *Infraestructura verde y corredores ecológicos de los pedregales: ecología urbana del sur de la Ciudad de México*, aborda 4 aspectos de la problemática urbana, referentes a la movilidad no motorizada, biodiversidad, infiltración y recuperación del agua de lluvia, y el rescate del espacio público (Lot, Camarena & Suárez, 2013).

En las últimas décadas se ha desencadenado un proceso de crecimiento que amenaza con la desaparición de las últimas porciones de roca volcánica que conforman lo que Camarena (2012) llama un *archipiélago de pedregales*. La zona de pedregales tiene una fracción significativa de su territorio cubierto de asfalto impermeable cubriendo y sellando grandes extensiones de estrato rocoso permeable, lo que impide la infiltración del agua en el subsuelo, por lo que se requiere de grandes y constantes inversiones para la creación de sistemas de infiltración. Por otro lado, una parte significativa del espacio en las calles se encuentra subutilizado, por lo que existe un enorme potencial para revegetar mediante sistemas que puedan conducir y captar grandes cantidades de agua de lluvia (Suárez et al., 2011). Los pedregales constituyen el tipo de suelo ideal para la infiltración de forma natural, sin embargo una gran parte del agua de lluvia continua conduciéndose hacia el alcantarillado sanitario, generando el colapso de los sistemas de drenaje, inundaciones y la contaminación del agua disponible para la recarga de los acuíferos.

El proyecto de infraestructura verde en los pedregales propone una red de espacios multifuncionales interconectados que den solución a diversas problemáticas urbanas relacionadas con la movilidad y el espacio peatonal, la carencia de espacios públicos de calidad, y al mismo tiempo que favorezcan la infiltración de aguas pluviales, la

conservación de corredores biológicos, la captura de carbono, la regulación del clima y la supervivencia de la biodiversidad dentro de la ciudad (Camarena, 2012).

En lo correspondiente a la gestión del agua de lluvia, el diseño de los modelos propuestos implica el tratamiento, la captación, la distribución, la evaporación y la disminución de la velocidad de conducción tanto en escalas familiares como otras de organización comunitaria, principalmente en cruces de calles y áreas verdes estratégicamente ubicadas. La propuesta consistió en crear una serie de fichas técnicas que permiten evaluar los costos de obra, así como dimensionar las acciones a ejecutar.

Etapa 1

Como primera etapa se llevó a cabo un análisis geodemográfico (Figura 5-10) que comprende la accesibilidad de los núcleos de población a las áreas verdes, espacios abiertos y reservas naturales, mediante el uso de un sistema de información geográfico (SIG) y datos demográficos. Esta información permitió ubicar zonas carentes de áreas verdes, conocer la disponibilidad de espacio público y la accesibilidad. El análisis aporta información relevante como la densidad de población, el nivel económico y la escolaridad, es decir, la dinámica social ligada a la problemática ambiental. Con el análisis fue también posible hacer un mapeo topográfico que permitió identificar zonas de inundación recurrente, y al mismo tiempo sectores con alto potencial para la infiltración del agua de lluvia, como son los grandes camellones sobre ejes viales primarios que atraviesan la zona del pedregal de Santo Domingo y que conservan afloramientos naturales de piedra.

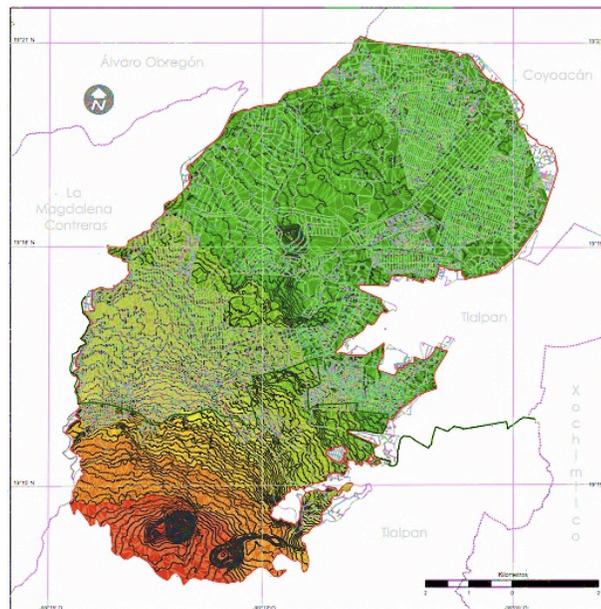


Figura 5-10. Ejemplo del análisis geodemográfico. Fuente: Suárez et al. 2011.

Etapa 2

En la segunda etapa del proyecto se estudiaron diferentes prototipos de diseño urbano, geometría vial y reforestación urbana con especies nativas del pedregal como propuestas para la modificación y ampliación de aceras, dotación de carriles para la movilidad de los ciclistas, colocación de dispositivos para la reducción de la velocidad vehicular y administración de escurrimientos:

Cuadro 5-1. Prototipos propuestos relativos a la gestión de los escurrimientos.

Prototipo 1	Disminuir la velocidad y el volumen de los escurrimientos	En vialidades con pendientes pronunciadas y topografía irregular, la disminución de la velocidad de los escurrimientos es una opción para encauzar grandes volúmenes de agua en poco tiempo y así evitar inundaciones inmediatas a la tormenta.
Prototipo 2	Infiltración prolongada	Una de las principales ventajas de este prototipo consiste en la posibilidad de revegetación e instalación de jardinería de bajo mantenimiento. Actualmente es un modelo muy utilizado en zonas con precipitación constantes.
Prototipo 3	Uso óptimo de espacios	El establecimiento de sistemas de almacenamiento de agua en espacios públicos representa un mejor uso del espacio, particularmente en las vialidades que generalmente solo son utilizadas como superficies de rodamiento. En la práctica pueden ser utilizados para la captación, infiltración y almacenamiento de importantes volúmenes de agua.
Prototipo 4	Cosecha de agua	La captación de agua para riego, lavado y otros usos secundarios es una alternativa para incrementar la recarga de los mantos acuíferos. La instalación de grandes colectores en áreas públicas como parques, camellones y espacios abiertos ayuda directamente al ahorro energético.
Prototipo 5	Iniciativas a nivel familiar	La instalación de sistemas familiares para cosecha e infiltración de aguas pluviales toma en cuenta las actuales características urbanas y constructivas de la ciudad, representando un enorme alivio para la infraestructura urbana.
Prototipo 6	Almacenamiento doméstico	El paisaje urbano de la Ciudad de México se caracteriza por un gran número de tinacos en las azoteas; en el caso de cisternas convencionales estas empiezan a ser sustituidas por reservorios verticales, fabricados en materiales ligeros libres de excavación y fáciles de instalar en viviendas ya construidas.

Fuente: Adaptado de Suárez et al. 2011.

Etapa 3

Finalmente, durante la tercera etapa del proyecto se elaboraron una serie de talleres participativos con funcionarios de gobierno, actores sociales y ciudadanos que de manera colectiva aportaron su conocimiento para dar soluciones relativas a la problemática urbana. Se acordó la implementación de un prototipo de diseño para poner a prueba uno de los modelos.

5.4 Costos y beneficios de la implantación de SUDS

El costo de implantar un esquema de SUDS generalmente cae en el desarrollador del proyecto, y es típicamente similar al de un sistema de drenaje convencional equivalente. Además de los costos asociados a la construcción, los SUDS pueden requerir supervisión y mantenimiento de rutina y, por lo tanto, se requerirá un flujo de financiamiento operativo a largo plazo. Con el fin de que los costos en curso sean considerados en las etapas de planificación y diseño, la Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción en el Reino Unido, recomienda que un enfoque de costo de vida útil (WLC) se tome en cuenta dentro del esquema de costos, lo que implica estimar el valor presente de los costos totales de la estructura a lo largo de su vida útil probable (Woods-Ballard et al., 2007).

El costo de vida útil requiere la identificación de los costos y beneficios futuros haciendo referencia a costos actuales utilizando técnicas de contabilidad estándar, como el *valor presente*, considerado como la suma de dinero que se necesita hoy para satisfacer todos los costos futuros que puedan surgir a lo largo del ciclo de vida de un sistema o estructura como indica la ecuación (18).

$$PV = \sum_{t=0}^{t=N} \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (18)$$

donde: N = Horizonte de tiempo en años

C_t = Costo total en el año t

i = Tasa de interés

Evaluar las consecuencias financieras de un proyecto de SUDS considerando todos los costos del ciclo de vida, requiere identificar los gastos de construcción, instalación, operación y mantenimiento, así como los costos de disposición final del sistema una vez concluida su vida útil (City of Melbourne, 2011).

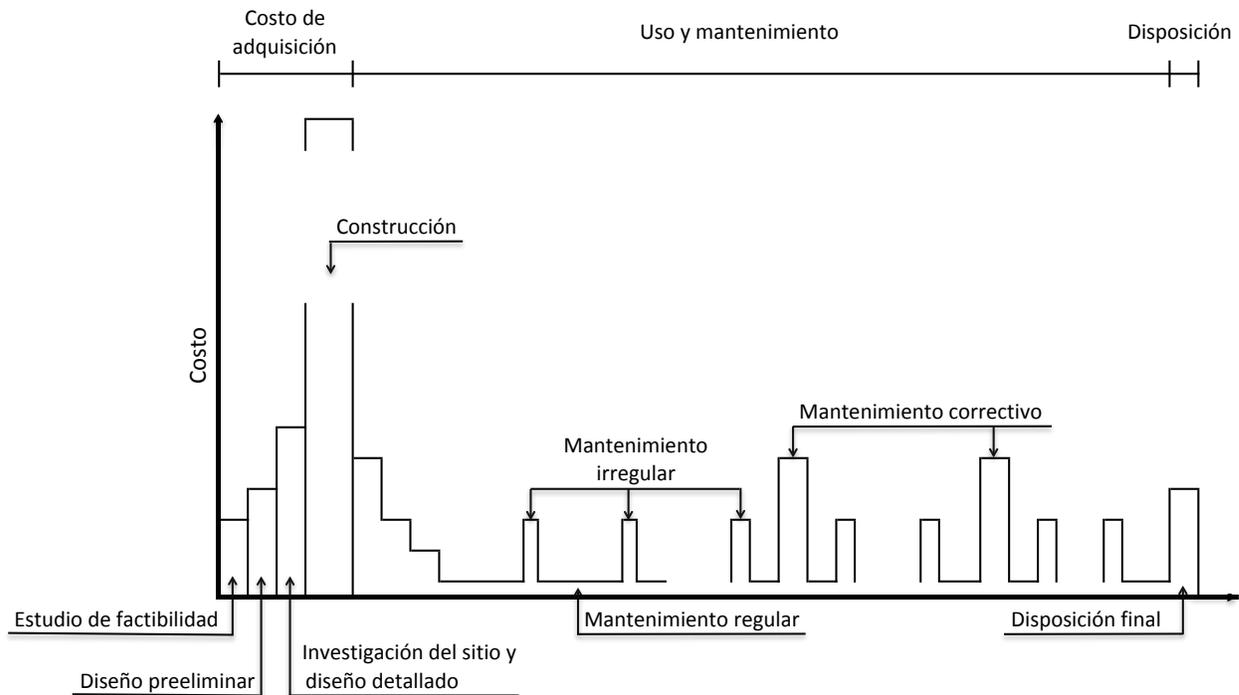


Figura 5-11. Perfil conceptual de gastos SUDS. Fuente: Adaptado de Woods-Ballard et al. 2007

Los datos sobre los costos de un SUDS determinado proporcionan información muy útil para futuros proyectos. Los siguientes indicadores deben ser considerados como parte de la evaluación de los costos del sistema (Cherqui et al., 2013):

- **Costos preliminares:** representan los costos totales asociados con la definición del sistema, por ejemplo, la selección del sitio y los estudios de viabilidad, y el total de los costos de diseño preliminar y detallado.
- **Costos de construcción:** Debe incluir toda la información sobre los factores que afectan los costos de construcción, como el tamaño, las dificultades del sitio, materiales, los requisitos de protección del patrimonio, etc.
- **Gastos de operación y mantenimiento:** Los costos de operación se desglosan en: costos de mantenimiento regulares y costos de mantenimiento correctivo. A su vez, el mantenimiento regular puede ser subdividido en mantenimiento estético y mantenimiento funcional. Se requiere mantenimiento funcional para garantizar el rendimiento y la seguridad pública, mientras que el mantenimiento estético es importante para la aceptación del público y los beneficios ambientales. El mantenimiento estético es más relevante para los SUDS visibles, especialmente en los que están ubicados cerca de zonas residenciales o de espacio público abierto (Woods-Ballard et al., 2007).

Cuando se incluyen medidas de gestión no estructurales tales como programas de limpieza de calles y de educación pública como parte de un esquema de drenaje, estos costos deberían incluirse como un costo de mantenimiento regular. Es muy difícil, sin embargo, estimar los costos de forma general de este tipo de actividades.

- **Costos de Disposición final:** Es probable que el sistema de drenaje deba ser rehabilitado completamente al final de su vida útil, por lo que los costos de eliminación y desmantelamiento necesarios para el sistema de drenaje serán aceptados por el organismo operador. Tales costos tienden a ser pequeños debido a la naturaleza ajardinada de los SUDS y la falta de infraestructura física significativa en la mayoría de los casos.
- **Costos Ambientales.** Los riesgos que pueden conducir a daños ambientales considerables pueden ser, hasta cierto punto, gestionados a través del diseño, monitoreo regular y el mantenimiento apropiado. Sin embargo, los costos asociados a los daños por inundaciones como resultado de una sobrecarga en el sistema (debido a la superación de diseño y / o bajo rendimiento), recaerán probablemente al propietario u organismo operador, por lo tanto será adecuado incluir una estimación de los riesgos y los costos asociados con tales incidentes de la siguiente manera:

$$\text{Costo del riesgo anual (\$)} = \text{Probabilidad anual de ocurrencia (\%)} \times \text{Consecuencias (\$)}$$

Del mismo modo, también podría hacerse una estimación de la probabilidad de un evento de contaminación grave que se produce, que puede requerir la rehabilitación completa del sistema y / o incurrir en multas regulatorias.

Los costos de un sistema de drenaje sostenible se pueden comparar con los diversos beneficios que ofrecen. Los SUDS incluye una variedad de prácticas que pretenden imitar y preservar los procesos naturales de drenaje para manejar las aguas pluviales. Éstas prácticas propician la retención del agua de lluvia y favorecen la infiltración en el suelo en lugar de permitir que escurra hacia el sistema de drenaje sanitario, lo que contribuye a los problemas de inundaciones y contaminación. El uso de SUDS reduce los escurrimientos superficiales, lo que significa un menor requerimiento de alcantarillas para hacer frente a un aumento en el volumen de escurrimientos. También reducen la necesidad de mejorar el tratamiento al reducir las concentraciones de los contaminantes propios de los escurrimientos urbanos. Por lo tanto, los SUDS son recomendados como base para el drenaje urbano (EPA, 2012 y Steeley et al., 2001).

Cabe recordar que las soluciones sostenibles para el drenaje urbano son por lo general sistemas de prevención y control, tanto de la cantidad como de la calidad del agua, por lo que el uso de estos sistemas dentro de un sitio desarrollado puede disminuir la necesidad de proporcionar soluciones de drenaje y tratamiento complejos y costosos aguas abajo. Cuando los SUDS son utilizados en términos generales, también puede mitigar el efecto isla de calor urbano, aumentar el ahorro de energía y el valor estético de propiedades a través de una mayor vegetación y paisajismo (EPA, 2012).

La adopción de este enfoque innovador y alternativo al convencional para el manejo del agua pluvial en entornos urbanos, reporta una serie de benéficos añadidos entre los que se cuentan:

- Mejora de la calidad del agua. Los escurrimientos de aguas pluviales pueden recoger contaminantes como derivados de petróleo, bacterias, sedimentos, metales, hidrocarburos y algunos nutrientes de las superficies impermeables y descargarlos en los cuerpos receptores. El uso de técnicas SUDS reducirá la carga contaminante del agua antes de llegar a su destino final.
- Reducción del número de eventos de inundación. La atenuación natural por infiltración y almacenamiento que ofrecen los sistemas urbanos de drenaje sostenibles pueden reducir el riesgo de inundaciones en un área desarrollada y evitar cualquier aumento en el riesgo de inundaciones aguas abajo. En las ciudades que dependen de canales y sistemas de drenaje convencional para desviar el escurrimiento de los cursos de agua locales, las inundaciones pueden ocurrir cuando grandes volúmenes de aguas entran al sistema rápidamente. El paradigma SUDS pretende reducir el volumen y la velocidad de los escurrimientos de aguas pluviales y, por lo tanto, el riesgo de inundaciones de magnitud considerable y los daños asociados.
- Restauración del hábitat acuático. El rápido movimiento de los escurrimientos erosiona las orillas de los ríos y canales, destruyendo el hábitat de la vida acuática. El uso de SUDS reduce la cantidad de agua de lluvia que descarga a los cuerpos receptores, lo que ayuda a mantener el funcionamiento del ecosistema.

- Mejora en la recarga de las aguas subterráneas. Los escurrimientos que se transportan rápidamente a través de canales y tuberías no pueden ser infiltrados en el suelo, los SUDS conservan la precipitaciones en el lugar, lo que le permite infiltrarse hasta llegar al nivel freático. La retención del agua superficial dentro de un desarrollo urbano puede ayudar a mantener la recarga natural y el equilibrio de las aguas subterráneas, con esto se favorece la supervivencia de la vegetación y evita posibles problemas en el suelo que puedan resultar de que éste se seque.
- Beneficios estéticos. La infraestructura tradicional de manejo de aguas pluviales incluye tuberías, desagües y canales, entre otros elementos antiestéticos. El uso de SUDS a nivel general puede aumentar el valor de una propiedad y mejorar los espacios públicos haciéndolos más agradable a la vista, sostenibles y amigables con la fauna.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

La información disponible indica que la urbanización y el desarrollo urbano tradicional representativo del último siglo generan la degradación ambiental y el desequilibrio ecológico, siendo el agua uno de los recursos más afectados. Es importante reconocer que los problemas de inundaciones, contaminación y escasez de agua en una ciudad son en gran medida el resultado de un modelo de administración no adecuado, lo que implica que las grandes ciudades se conviertan en importantes unidades de gestión de recursos hídricos. Sin embargo, las técnicas convencionales de manejo del agua urbana han mostrado su incapacidad para hacer frente a eventos extremos derivados de alteraciones ambientales y cambios demográficos, quedando obsoletos ante las necesidades actuales con consecuencias ambientales y sociales que pueden mitigarse mediante el uso de un nuevo modelo de administración sensible al agua y orientado hacia un futuro sostenible.

Para alcanzar este objetivo, se requiere un enfoque que integre aspectos técnicos, sociales, ambientales, económicos, jurídicos e institucionales, adicionalmente es necesario:

- a) Cambio de comportamiento frente a los recursos: el cambio de comportamiento relativo a la administración del agua implica entender las limitaciones de este recurso tanto en calidad como en cantidad. Con la finalidad de reducir los impactos adversos al mínimo, debe promoverse el uso racional en las diversas actividades humanas, y la conservación de las fuentes de abastecimiento.
- b) Entender el ciclo hidrológico: es decir remitirse a los procesos hidrológicos naturales intentando preservarlos e integrarlos en el entorno urbano acercándolo a los usuarios y habitantes. Esto significa mantener zonas para la infiltración, y los cursos de escurrimiento naturales. En las grandes ciudades el agua debe gestionarse de manera integral, respetando el modelo de ciclo.

- c) Contextos administrativos e institucionales adecuados: contar con contextos administrativos e institucionales adecuados es fundamental para generar un marco de actuación favorable, que promueva la descentralización de servicios, nuevos modelos educativos y regulación.
- d) Infraestructura adecuada: la conservación de los procesos hidrológicos requiere de infraestructura que sea capaz de preservar el régimen hidrológico natural, es decir, mantener en la medida de lo posible los niveles de infiltración, evaporación y escurrimiento naturales, que sea versátil y estéticamente agradable.

Anteriormente el drenaje se consideraba tarea exclusiva de la ingeniería civil, sin embargo, el diseño de un SUDS se trata de un proceso complejo que requiere la intervención de un equipo multidisciplinario, integrado por ingenieros, hidrogeólogos, urbanistas, arquitectos, paisajistas, contratistas, operadores, administradores, usuarios y propietarios. No obstante, la mayoría de los especialistas y profesionales tienden a enfocar y priorizar sus campos respectivos en el proceso de toma de decisiones. Como resultado, las técnicas específicas y soluciones que se aplican a menudo, no tienen en cuenta la importancia de otras áreas. Por lo tanto es necesario un enfoque integral que incorpore las diversas disciplinas en una plataforma común para facilitar soluciones innovadoras y sostenibles.

Los sistemas de drenaje sostenibles están ganando cada vez mayor importancia, como lo demuestran los ejemplos de aplicación mostrados, resultado de un mayor reconocimiento de los efectos positivos de un sistema de este tipo en la naturaleza, el medio ambiente y la sociedad. Sin embargo, a pesar del desarrollo de las técnicas y herramientas, la aplicación de un sistema drenaje sostenible sigue siendo una tarea muy difícil en la realidad. Existen diversos factores que representan un desafío para lograr una gestión sostenible del agua, entre ellos se encuentran:

- Falta de conciencia por parte de los consumidores y usuarios
- Centralización de servicios
- Falta de difusión de conocimientos y experiencias
- Barreras culturales
- Falta de protocolos estandarizados de diseño y monitoreo

En esta revisión se mostró una variedad de sistemas de drenaje sostenible disponibles para manejar los escurrimientos de las aguas pluviales con distintas características y requerimientos. La eficiencia de cada uno de ellos se ha documentado solo hasta cierto punto, pero aun hay necesidad de investigación, sobre todo para los tipos de SUDS más nuevos e innovadores como los distintos tipos de superficies permeables. Por otro lado, se mostró también:

- Que los SUDS correctamente diseñados, construidos y mantenidos, tienen la capacidad de mitigar los impactos adversos derivados de la urbanización relativos al agua.
- El potencial de la captación de agua de lluvia como fuente de abastecimiento sostenible, lo que reduce el estrés puntual de las fuentes de abastecimiento convencionales.
- La importancia de acercar los procesos hidrológicos a los usuarios y habitantes como medida de concientización y educación.

Por último, es pertinente mencionar que a pesar de los notables progresos en el desarrollo de los sistemas de drenaje urbano y el manejo de las aguas pluviales durante los últimos años, algunas de las deficiencias comunes de conocimiento identificadas en publicaciones recientes no han sido aun debidamente tratadas.

En México, esta manera innovadora de integrar el manejo del agua de lluvia en el paisaje urbano se encuentra todavía en una fase temprana, los enfoques alternativos son atractivos, pero su adopción ha sido lenta, los SUDS requieren un enfoque innovador y por lo tanto un grado de riesgo. No debe suponerse que los SUDS son la única respuesta a los problemas de las aguas pluviales, es de esperarse que la evolución de los sistemas de drenaje continúe debido principalmente a la naturaleza dinámica de las zonas urbanas y de sus habitantes.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre Aguirre, H. (2010) `La explotación irracional del agua y el agotamiento de los mantos acuíferos, graves problemas mundiales', *Columna Visión Universitaria de la sección Mercados del Periódico El Financiero*, 25 de Marzo de 2010.

https://intranet.ebc.edu.mx/contenido/vidaebc/descargas/vis_doc/eco/vision_univ250310.pdf

Álvarez-Campana Gallo, J., Suárez, J., Puertas, J., Anta, J. & Jácome, A. (2014) `Hacia un urbanismo más integral y sostenible: un enfoque renovado de la ingeniería ambiental sanitaria desde la nueva estrategia de Desarrollo Urbano Sensible al Agua', *CONAMA 2014, CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE*.

Anaya Garduño, M. (2011) *Captación de agua de lluvia. Solución caída del cielo*, Mundi-Prensa México y Colegio de Postgraduados. México, D.F.

Aparicio Mijares, F. (2007) *FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE*, Editorial Limusa, México.

Arango Ruiz, A. (2004) `La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua', *Revista Lasallista de Investigación*, Corporación Universitaria Lasallista, Vol. 1, No. 2, pp. 61-68, Colombia.

Bahri, A. (2012) `Gestión integrada de aguas urbanas', *TEC BACKGROUND PAPERS*, No. 16, Global Water Partnership.

http://www.gwp.org/Global/ToolBox/Publications/Background%20papers/GWP_TEC16_ESP_FINAL.pdf

Ballén Suárez, J., Galarza García, M. & Ortiz Mosquera, R. (2006) `HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA', Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água João Pessoa (Brasil), 5 a 7 de junho de 2006.

Banco Mundial (2012) `Gestión Integrada de Aguas Urbanas', *Blue water green cities*, Water Partnership Program & WSP Programa de agua y saneamiento.

<http://siteresources.worldbank.org/INTLAC/Resources/2578031351801841279/1PrincipalGestionIntegralAguasUrbanasESP.pdf>

BANCO MUNDIAL (2013) *Agua urbana en el Valle de México: ¿Un camino verde para mañana?*, CONAGUA, BANCO MUNDIAL, GOBIERNO DE ESPAÑA & ANEAS, México.

http://www.agua.unam.mx/sacmex/assets/docs/AguaUrbana_ValleMexico.pdf

Barkin, D. (2009) Simposio "El acceso al agua en América: historia, actualidad y perspectivas", *53 Congreso Internacional de Americanistas*, México, Julio de 2009.

Bayona Gutiérrez, H. & Prada Uribe, S. (2008) `COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD OBTENIDO EN EL LABORATORIO CON LOS CALCULADOS A PARTIR DE LAS FÓRMULAS DE ALLEN HAZEN, SCHLICHTER Y TERZAGHI PARA ARENAS DEL RIO SOGAMOSO Y EL RIO MAGADALENA', Universidad Pontificia Bolivariana.

Boletín UNAM-DGCS-0181 (2002) *HUMEDALES ARTIFICIALES, NOVEDOSO SISTEMA DE LA UNAM PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES* [en línea], Banco de boletines, Consultado: 7 de Octubre de 2014.
http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2002/2002_0181bbb.html

Boogaard, F., Blanksby, J. & Jefferies, C. (2012) `Transnational knowledge exchange on SUDS. Case study: permeable pavement', *SUDSnet International Conference 2012 – Multiple Benefits from Surface Water Management*, Coventry TechnoCentre, University of Coventry, UK.

Bravo Inclán, L., Saldaña Fabela, P., Izurieta Dávila, J. & Mijangos Carro, M. (2013) *La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo*.
<http://www.imta.gob.mx/historico/images/noticias/notas-tecnicas/importancia-contaminacion-difusa.pdf>

Breña Puyol, A. (2004) *Precipitación y Recursos Hidráulicos en México*, Universidad Autónoma Metropolitana, Tlalpan, D.F. México.
<http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/precipitacion/PRHM04-libro.pdf>

Burgos, V. (2007) `Desarrollo Urbano de Bajo Impacto Hidrológico (DUBI): Una alternativa para una adecuada hidrología urbana del Gran Mendoza', *XXI Congreso Nacional del Agua 2007*. <http://t.ina.gov.ar/pdf/CRA-H.Sup-B-Desarrollo-Urbano-de-Bajo-Impacto-Hidrologico-en-el-Gran-Men.pdf>

Cabrera Delgadillo, M. & Méndez Hernández, E. (2012) `Norma para el diseño del drenaje pluvial urbano, alcances y oportunidades', *XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México, Noviembre 2012*, Asociación Mexicana de Hidráulica.

Camarena Berruecos, P. (2012) `Proyecto de infraestructura verde: ejercicio de integración transdisciplinaria en la UNAM', *Bitácora Arquitectura*, No. 25, pp. 36-41.
<http://www.revistas.unam.mx/index.php/bitacora/article/download/36135/39558>

Campos Aranda, D. (1998) *Procesos del Ciclo Hidrológico*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tercera reimpresión, San Luis Potosí, México.

Castro Fresno, D., Rodríguez Bayón, J., Rodríguez Hernández, J. & Ballester Muñoz, F. (2005) `Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)', *Interciencia*, vol. 30, núm. 5, pp. 255-260.

CEMDA (2006) *El agua en México: lo que todas y todos debemos saber*, Fondo Educación Ambiental (FEA), Alianza por una Nueva Cultura del Agua.

CENAPRED (2009) *Inundaciones*, Secretaría de gobernación, México, D.F.

CENAPRED (2013) *Inundaciones. SERIE fascículos*, Secretaría de gobernación, Versión electrónica.

http://www.files.cenapred.gob.mx/es/publicacionesRelevantes/FASCICULO_INUNDACIONES_2013.pdf.

CEPIS (1984) *Evaluación de plantas de tratamiento de agua. Tomo 1*, Programa de protección de la salud ambiental, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, Perú. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/016322/016322.htm>

Cherqui, F., Granger, D., Métadier, M., Fletcher, T., Barraud, S., Lalanne, P. & Litrico, X. (2013) *Indicators related to BMP performance: Operational monitoring propositions*, Novatech.

Chow, V., Maidment, D. & Mays, L. (1994) *Hidrología aplicada*, McGraw-Hill.

CINU (2012) 'La gestión sostenible del agua lleva consigo beneficios económicos, sociales y medioambientales, declaran los países', *Comunicado de prensa de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y UN Water, Río de Janeiro, 19 de junio de 2012.*

<http://www.cinu.mx/comunicados/2012/06/la-gestion-sostenible-del-agua/>

City of Melbourne (2011) *City of Melbourne WSUD Guidelines. Applying the Model WSUD Guidelines. An Initiative of the Inner Melbourne Action Plan*, Melbourne Water.

Colegio de Postgraduados (2012) *HIDROLOGÍA APLICADA A LAS PEQUEÑAS OBRAS HIDRÁULICAS*, SAGARPA, Subsecretaría de Desarrollo Rural, Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural.

http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_HIDROLOG%20C3%8DA.pdf.

Comisión Europea (2010) *Directiva marco sobre aguas*, Oficina de publicaciones, Noviembre 2010. <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/wfd/es.pdf>

CONAGUA (2007) *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Alcantarillado pluvial*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.

CONAGUA (2009a) *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Edición 2009*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.

CONAGUA (2009b) *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.

CONAGUA (2013) *Estadísticas del agua en México, Edición 2013*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-2-14Web.pdf>

Department of Environmental Conservation (2014) *Green Infrastructure Examples for Stormwater Management in the Hudson Valley*- [en línea], New York State Department of Environmental Conservation, consultado: 1 de Noviembre de 2014.
<http://www.dec.ny.gov/lands/73105.html>

Domínguez Mora, R. (2000) `Las Inundaciones en la Ciudad de México. Problemática y Alternativas de Solución', *Revista Digital Universitaria* [En línea], Vol. 1, No. 2. [Consultada: 21 de Julio de 2014]. <http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/proyec1/>

Domínguez Mora, R. (2011) `Diagnóstico resumido de los problemas de abastecimiento de agua y de inundaciones en el Valle de México', *Revista Digital Universitaria*, Vol. 12, No. 2. <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num2/art19/art19.pdf>

Dublin City Council (2005) *Greater Dublin Strategic Drainage Study. Regional Drainage Policies -Volume 3- Appendices Environmental Management. Appendix D Suds Policies and Case Studies*. Dublin City.

Duran Escamilla, P. (2010) `Captación de agua de lluvia, alternativa sustentable. Comunicación técnica', *CONAMA10 Congreso Nacional del Medio Ambiente*.

EPA (1999) *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practice*, Office of Water, United States Environmental Protection Agency, Washington DC, August 1999. <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/stormwater/#report>

EPA (2000) *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial*, Office of Water, United States Environmental Protection Agency, Washington DC, Septiembre de 2000.

EPA (2012) *Benefits of Low Impact Development*, Office of Wetlands, Oceans, and Watersheds, United States Environmental Protection Agency, Washington DC, March 2012.

EPM (2009) *Guía para el diseño hidráulico de Redes de Alcantarillado*, Empresas Públicas de Medellín, Medellín.
http://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/GuiaDisenoHidraulicoRedesAlcantarillado.pdf.

FAO (2000) *MANUAL DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA EXPERIENCIAS EN AMÉRICA LATINA SERIE: ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS No. 13*, Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile.

Febles Doménech, D., Perales Momparler, S. & Soto Fernández, R. (2009) *Innovación y Sostenibilidad en la Gestión del Drenaje Urbano: Primeras Experiencias de SuDS en la Ciudad de Barcelona*, Jornadas de Ingeniería del Agua, CEDEX, Madrid. 27-28, Octubre 2009.

Fernández, B., Montt, J. & Rivera, P. (2004) *Nuevos Enfoques para el Drenaje Urbano de Aguas Lluvias*, Centro de Aguas Urbanas, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Fletcher, T., Shuster, W., Hunt, W., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J., Steen Mikkelsen, P., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D. & Viklander, M. (2014) `SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage, *Urban Water Journal*. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

García de alba Verduzco, J. (2012) `Azoteas y techos verdes', *Sembrando Conciencia*, Año 1, No. 3.

García Haba, E. (2011) `CONTROL DE ESCORRENTÍAS URBANAS MEDIANTE PAVIMENTOS PERMEABLES: APLICACIÓN EN CLIMAS MEDITERRÁNEOS', *Master en ingeniería hidráulica y medio ambiente*, Universitat Politècnica de València.

Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, Secretaría de Obras y Servicios & Sistema de Aguas de la Ciudad de México (2007) *Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México*, México, D. F., Diciembre 2007.

Gomes Miguez, M. & Moura Rezende, O. (2012) `Urban Drainage Trends - A Pathway Towards More Sustainable Solutions', *Aqua-LAC*, Vol. 4, No. 2, pp. 69 - 83.

GWP (2011) *Hacia una gestión integrada de aguas urbanas*, Global Water Partnership, Stockholm, Agosto 2011.

Hinojosa Robles, E. (2014) `El manejo de áreas verdes en la Ciudad de México y Pekín: la búsqueda de la sustentabilidad en grandes ciudades', *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, Vol. 6, No. 1, pp. 69-77.
<http://www.revista.inecc.gob.mx/article/download/218/191>

Hoyer, J., Dickhaut, W., Kronawitter, L. & Weber, B. (2011) *Water Sensitive Urban Design. Principles and Inspiration for Sustainable Stormwater Management in the City of the Future. Manual*, SWITCH – Managing Water for the City of the Future, Berlin.
http://www.switchurbanwater.eu/outputs/pdfs/W51_GEN_MAN_D5.1.5_Manual_on_WSUD.pdf

INDEX (2013) *Design to improve life* [Página web], Consultado: 1 de Noviembre de 2014.
<http://designtoimprovelife.dk/rabalderparken/>

Jiménez Cisneros, B. (2001) *La contaminación Ambiental en México*, Editorial Limusa.

K. Jha, A., Bloch, R. & Lamond, J. (2012) `Ciudades e Inundaciones', *Guía para la Gestión Integrada del Riesgo de Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21*, THE WORLD BANK, Washington, D.C.

Kazmierczak, A. & Carter, J. (2010) *Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. A database of case studies*, GRaBS, INTERREG IVC & European Union.
<http://www.grabs-eu.org/membersarea/files/malmo.pdf>

Lashford, C., Charlesworth, S., Blackett, M. & Warwick, F. (2012) *Investigation of the use of a SUDS Management Train to reduce flooding in an urban environment*, SUDS Applied Research Group.

<http://www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/proceedingsonline/GISRUK2012/Papers/presentation-28.pdf>

León Garza, E. (2008) *Guía de agua y construcción sustentable*, AGUA.org.mx

http://www.agua.org.mx/index.php/component/docman/doc_download/252-guia-de-agua-y-construccion-sustentable?Itemid=100162

López de Asiain, M., Ehrenfried, A. & Pérez del Real, P. (2007) 'EL CICLO URBANO DEL AGUA Un nuevo modelo de sistema integral de gestión', *Revista IdeaSostenible*, No. 16

Lot, A., Camarena, P. & Suárez, A. (2013) 'Reserva Natural de la Ciudad Universitaria de México: reserva ecológica urbana en una megaurbe', *Forum de Sostenibilidad*, No. 6, pp. 18-40.

Luna Pabello, V. & Aburto Castañeda, S. (2014) 'Sistema de Humedales Artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón', *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, Vol. 17, No. 1, pp. 32-55.

Malinow, G. (2004) 'Inundaciones debidas a la operación o por fallas de obras hidráulicas', *Jornadas de Debate sobre Riesgo Hídrico, Inundaciones y Catástrofes*, Buenos Aires, Argentina.

<http://www.unesco.org.uy/phi/biblioteca/archive/files/8f2d07222d06aa587b5b1f68500e62c1.pdf>

McDonal, R., Weber, K., Padowski, J., Flörke, M., Schneider, C., Green, P., Gleeson, T., Eckman, S., Lehner, B., Balk, D., Boucher, T., Grill, G. & Montgomery, M. (2014) 'Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure', *Global Environmental Change*, Vol. 27, pp. 96-105.

MINVU (1996) *Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos*, Guía de diseño, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas Santiago, Chile.

http://www.minvu.cl/opensite_des_20070404114325_20070317115825.aspx

MINVU (2005) *GUÍA DE DISEÑO Y ESPECIFICACIONES DE ELEMENTOS URBANOS DE INFRAESTRUCTURA DE AGUAS LLUVIAS*, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Gobierno de Chile, Santiago, Chile.

Molina León, M., Gutiérrez, L. & Salazar, J. (2011) *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE SUDS PARA EL PLAN DE ORDENAMIENTO ZONAL NORTE POZN*, Secretaría distrital de ambiente, Bogotá.

<http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/73754/Sistema+Urbanos+de+Drenaje+Sostenible>.

- Monroy Hermosillo, O. (2013)** `Manejo sustentable del agua en México', *Revista Digital Universitaria* [en línea], 1 de Octubre de 2013, Vol. 14, No. 10, [Consultada: 5 de Agosto de 2014]. <http://www.revista.unam.mx/vol.14/num10/art37/index.html>
- Navarro Arismendy, W. (2007)** `ESTIMACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD, DURACION Y PERIODO DE RETORNO (I-D-Tr), A TRAVES DE REGISTROS PLUVIOMETRICOS', *Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Celaya*, Ponencia presentada en Expoagua 2007, Guanajuato, GTO.
- ONU (2010)** *Agua y ciudades. Hechos y cifras*, Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio. http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/swm_cities_zaragoza_2010/pdf/facts_and_figures_long_final_spa.pdf
- ONU-DAES & ONU-Agua (s.f)** *Decenio Internacional para la acción 'El agua fuente de vida' 2005-2015*, [Página Web], Consultado: 08 de Junio 2014. <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>
- Oñate-Valdivieso, F. (2009)** `Hidrología', *Apuntes de clase*, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. <http://www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/hidrologia.pdf>
- Osornio Berthet, L. (2012)** `Captación y tratamiento de agua de lluvia', *II Encuentro "El posgrado en la ingeniería civil"*, Instituto Politécnico Nacional, ESIA SEPI U. Zacatenco.
- Pacheco Montes, M. (2008)** `Avances en la Gestión Integral del Agua de Lluvia (GIALL): Contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de "Lluviatl" en México.', *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, núm. 3, pp. 39-57.
- Pacheco Montes, M. (2009)** *La Gestión del Agua Lluvia y la Reducción de Riesgos Urbanos*. La Gestión del Riesgo Urbano en América Latina: Recopilación de artículos. Ciudad de Panamá, Panamá.
- Padrón Cruz, A. & Cantú Martínez, P. (2009)** `El Recurso agua en el entorno de las ciudades sustentables', *Revista Cultura Científica y Tecnológica*, No. 31.
- Parker, N. (2010)** `ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF WATER SENSITIVE URBAN DESIGN IN SOUTHEAST QUEENSLAND', *A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS OF THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING*, Faculty of Built Environment and Engineering Queensland University of Technology.
- Peña Guzmán, C. & Lara Borrero, J. (2012)** `TRATAMIENTO DE AGUAS DE ESCORRENTÍA MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES: ESTADO DEL ARTE', *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 22, núm. 2, pp. 39-61.

Perales Momparler, S. (2008) `Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)', *Semana Temática: Agua y Servicios de Abastecimiento y Saneamiento*, Exposición Internacional sobre Agua y Desarrollo Sostenible (Expo Zaragoza 2008), Zaragoza.

Perales Momparler, S. & Andrés-Doménech, I. (2007) *LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE: UNA ALTERNATIVA A LA GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA*, Equipamiento y Servicios municipales, nº 133, pp 66-77.

Perales Momparler, S. & Valls Benavides, G. (2012) `Sistemas de drenaje sostenible (SuDS)', *Paisea, revista de paisajismo*, 024, pp. 68-75.

Perales Momparler, S., Andrés-Doménech, I. & Fernández Escalante, A. (2008) `LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN LA HIDROGEOLOGÍA URBANA', *IX Simposio de hidrología*, Asociación española de hidrogeólogos.

Pere Sunyer, M. & Peña del Valle Isla, A. (2008) `QUINCE AÑOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE EN MÉXICO', *X Coloquio Internacional de Geocrítica. DIEZ AÑOS DE CAMBIOS EN EL MUNDO, EN LA GEOGRAFÍA Y EN LAS CIENCIAS SOCIALES, 1999-2008* [en línea], Barcelona, 26 - 30 de Mayo de 2008, Universidad de Barcelona, Consultado: 23 de Julio de 2014. <http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/317.htm>

Pérez Farrás, L. (2005) `Teoría de la sedimentación', *Cátedra de hidráulica aplicada a la ingeniería sanitaria*, Instituto de ingeniería sanitaria y ambiental, Facultad de ingeniería, Univesidad de Buenos Aires.

Perló Cohen, M. (2013) `NUEVOS ENFOQUES PARA RESOLVER LOS PROBLEMAS DEL DESARROLLO HÍDRICO SUSTENTABLE: EL DISEÑO URBANO SENSIBLE AL AGUA', ponencia presentada en las Jornadas del Agua – UNAM del 27 al 29 de Agosto de 2013. http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/08_conflictos/perlo_manuel.pdf

Poleto, C. (2011) `SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): Uma Contextualização Histórica', *Revista Thema*.

Ramalho, R. (1996) *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*, Edición en español, Editorial Reverté, Barcelona.

Rodríguez Bayon, J., Rodríguez Hernández, J., Gómez-Ullate Fuente, E. & Castro Fresno, D. (2008) *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE. SUDS*, Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Santander, Universidad de Cantabria. <http://www.caminospaisvasco.com/Profesion/Publicaciones%20de%20nuestros%20colegiados/suds>.

Rodríguez Hernández, J. (2013) `Nuevas tendencias en la gestión del drenaje pluvial en una cuenca urbana', *TRABAJO FIN DE MASTER*, Universidad de la Rioja, España.

- Rolland, L. & Vega Cárdenas, Y. (2010)** `La gestión del agua en México', *POLIS*, Vol. 6, No. 2, pp. 155-188.
<http://www.juridicas.unam.mx/publica/librev/rev/polis/cont/20102/art/art6.pdf>
- Salinas Salas, G. (2012)** `Comportamiento de la desimentación en un sistema de micropartículas', *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol. XIII, No. 2, pp. 257-262.
- Sánchez Gonzáles, D. (2011)** `Precipitaciones extremas y sus implicaciones en procesos de remoción en masa en la planificación urbana de Tampico, México', *Cuadernos Geográficos*, Núm. 48, pp. 135-159.
- Sánchez San Román, F. (2012)** *Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación – Escorrentía*, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España.
<http://hidrologia.usal.es>
- Scheerer, J. (2011)** *Aprovechamiento de aguas pluviales: Documento Guía*, Ponencia presentada en Noves eines per l'impuls municipal als mecanismes d'estalvi i reaprofitament d'aigua en edificis, Barcelona, 15 de Junio de 2011, consultado: 28 Mayo de 2014.
- SEMARNAT (2013)** *Antecedentes*, [Página Web], Consultado: 7 de Septiembre de 2014.
<http://www.semarnat.gob.mx/conocenos/antecedentes>
- Sharma, D. (2008)** `Sustainable Drainage System (SuDs) for Stormwater Management: A Technological and Policy Intervention to Combat Diffuse Pollution', *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México (2012)** *EL GRAN RETO DEL AGUA EN LA CIUDAD DE MÉXICO*, México D.F.
- Sotelo, J., Ovejero, G., Delgado, J. & Martínez, I. (2001)** *Eliminación de compuestos organoclorados para potabilización de agua mediante un proceso de adsorción-regeneración en carbón activado*, Dpto. de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, España.
- Srinivas, H. (2009)** *Urban Water Resources Management: An Integrated Urban Water Strategy*, Global Development Research Center. <http://www.gdrc.org/uem/water/urban-water.html>
- Steeley, G., Barker, A., Bayliss, D., Brook, D., Conlin, J., Chapman, J., Chatfield, P., Baker, D., Crichton, D., Duncan, A., Evans, S., Goudie, J., Johnson, M., Luck, B., Maksimovic, C., Redfeam, S., Gillman, S., Spurgeon, J. & White, P. (2001)** *Sustainable urban drainage systems. Best practice manual for England, Scotland, Wales and North Ireland*. CIRIA C523. London.

Suárez, A., Camarena, P., Herrera, I. & Lot, A. (2011) *Infraestructura verde y corredores ecológicos de los pedregales: ecología urbana del sur de la Ciudad de México*, UNAM, ICyTDF y Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel UNAM, México, D.F.
http://centro.paot.org.mx/documentos/unam/infraestructura_verde.pdf

Tucci, C. (2006) *Gestión de inundaciones urbanas*, WMO.

UN-WATER (2010) *Preguntas más frecuentes sobre la calidad del agua*, Día Mundial del Agua 2010, United Nations Environment Programme.

UNESCO (2009) *Educación para el Desarrollo Sostenible*, [Página Web], Consultado: 11 de Agosto de 2014, <http://www.unesco.org/new/es/education/themes/leading-the-international-agenda/education-for-sustainable-development/education-for-sustainable-development/>

Valls Benavides, G. & Perales Momparler, S. (2008) *INTEGRACIÓN DE LAS AGUAS PLUVIALES EN EL PAISAJE URBANO: UN VALOR SOCIAL A FOMENTAR*, I Congreso Nacional de Urbanismo y Ordenación del Territorio. Bilbao Mayo de 2008.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. & Shaffer, P. (2007) *The SUDS Manual*, CIRIA C697, London.

WWAP (2011) 'Agua para el desarrollo sostenible de los asentamientos urbanos humanos', *Principales resultados de la tercera edición del Informe de la ONU sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: El agua en un mundo en constante cambio*, ONU-Agua & ONU-Hábitat.
http://webworld.unesco.org/water/wwap/news/pdf/WWAP_Urban_Setls_Sp_090311_web.pdf

Zafra Mejía, C., Temprano Gonzáles, J. & Tejero Monzón, I. (2009) 'Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía', *Ingeniería e Investigación*, vol. 29, núm. 1, pp. 101-108.

Zhou, Q. (2014) 'A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts', *Water*, No. 6, pp. 976-992.
<http://www.mdpi.com/2073-4441/6/4/976/pdf>