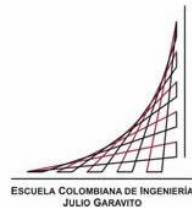


**Maestría en Ingeniería Civil**

**Elementos convencionales y no convencionales para la captación  
del drenaje urbano de aguas lluvias**

**Leidy Johanna Franco Calderón**

**Bogotá, D.C., 21 de agosto de 2015**



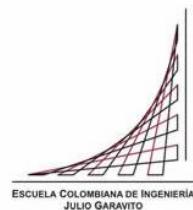
**Elementos convencionales y no convencionales para la captación  
del drenaje urbano de aguas lluvias**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Recursos Hidraulicos y Medio Ambiente**

**Leidy Johanna Franco Calderón**

**Director: Héctor Alfonso Rodríguez Díaz**

**Bogotá, D.C., 21 de agosto de 2015**



La tesis de maestría titulada “Elementos convencionales y no convencionales para la captación del drenaje urbano de aguas lluvias”, presentada por Leidy Johanna Franco Calderón cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente

**Director de la tesis**

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

**Jurado**

Jairo Alberto Romero Rojas

**Jurado**

Germán Ricardo Santos Granados

Bogotá, D.C., 21 de agosto de 2015

## RESUMEN

El objetivo principal de un sistema de drenaje urbano es permitir el paso seguro de los peatones y los vehículos, evacuando la escorrentía con rapidez para evitar inundaciones. Sin embargo, el desarrollo de las ciudades ha modificado el ciclo hidrológico natural y aporta gran cantidad de contaminantes a las corrientes superficiales que reciben el agua lluvia del sistema urbano. Por estas razones se han desarrollado sistemas de aguas lluvias no convencionales, acordes con el desarrollo sostenible, denominados sistemas urbanos de drenaje sostenible, SUDS.

Teniendo en cuenta que el sistema de drenaje urbano comienza con la captación en el sitio de origen de la escorrentía, en este artículo se plantea el estudio de los elementos convencionales y no convencionales para la captación de aguas lluvias, estableciendo criterios generales de selección y diseño, y la clasificación de los SUDS.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	14
1.1. Problema .....	14
1.2. Objetivos .....	15
1.2.1. General .....	15
1.2.2. Específicos .....	16
2. DRENAJE URBANO DE AGUAS LLUVIAS.....	17
2.1. Drenaje Urbano. Convencional y no Convencional .....	17
2.1.1. Drenaje urbano convencional.....	17
2.1.2. Drenaje urbano no convencional.....	17
2.2. Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS). Definiciones .....	18
2.2.1. Definición del término sostenible.....	18
2.2.2. Definición y objetivos de los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS). 19	
3. GUÍAS GENERALES PARA EL DISEÑO DEL DRENAJE URBANO.....	21
3.1. Características de la Vía.....	22
3.1.1. Fenómeno de hidropneación (8) (9) .....	22
3.1.2. Pendiente longitudinal (8) (9) .....	23
3.1.3. Pendiente transversal (8) (9) (10) (11) .....	24
3.1.4. Intercepciones (11) .....	26
3.1.5. Seguridad (10) (11) (12).....	26
3.1.6. Configuración típica de las vías urbanas (13) (14) .....	27
3.2. Frecuencias de Diseño y Ancho Máximo de Esparcimiento (8) (9) (14) .....	36
3.2.1. Criterios de selección de la frecuencia de diseño: compensación del riesgo (8) (9) 37	

3.2.2.	Consideraciones sobre las guías de diseño para frecuencias de diseño y ancho de esparcimiento permitido (8) (9) .....	39
3.2.3.	Periodos de retorno o grados de protección recomendados por el RAS 2000	42
3.2.4.	Periodos de retorno o grados de protección recomendados por la EAB.....	42
3.2.5.	Periodos de retorno o grados de protección recomendados por la EMP .....	44
3.2.6.	Tormenta de chequeo (9) (14).....	44
3.3.	Estudios Hidrológicos. Estimación de Caudales (9) (18) (21) (22) .....	46
3.3.1.	Cálculo del caudal de diseño (8) (9) .....	47
4.	CAPTACIONES DE DRENAJE URBANO CONVENCIONALES .....	65
4.1.	Procedimiento para el Diseño de las Captaciones de Drenaje Urbano .....	65
4.2.	Tipos de Cunetas .....	67
4.2.1.	Hidráulica del flujo en la cuneta (13) .....	70
4.2.2.	Demostración de las ecuaciones utilizadas para el cálculo del caudal transportado por una cuneta en una vía (adaptación realizada de la referencia (23))	75
4.2.3.	Cuneta con sección transversal compuesta (13) .....	81
4.2.4.	Cuneta con sección transversal en forma de V (14) .....	83
4.2.5.	Cuneta con sección transversal circular (24) .....	84
4.2.6.	Cálculo de la capacidad de la calle (26) .....	85
4.3.	Sumideros .....	100
4.3.1.	Localización de las entradas hidráulicas del drenaje urbano (8) (26) (13) (11) 102	
4.3.2.	Hidráulica de los sumideros (8) (27) (26).....	105
4.3.3.	Factor de obstrucción (26) .....	106
4.3.4.	Sumideros de rejilla (8) (13) (11) (27) (26) .....	109
4.3.5.	Sumideros laterales (8) (11) (27) (13) (26) .....	127
4.3.6.	Sumideros combinados (8) (11) (13).....	137
4.3.7.	Sumideros ranurados (8) (13) (27) (28).....	138

5. CAPTACIONES.....	142
5.1. Captaciones Convencionales y no Convencionales.....	142
5.1.1. Captaciones convencionales.....	142
5.1.2. Captaciones no convencionales.....	142
5.2. Clasificación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) .....	142
5.3. Clasificación Propuesta para los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS).....	156
5.3.1. Descripción general y uso de las estructuras SUDS .....	159
6. CAPTACIONES DE DRENAJE URBANO NO CONVENCIONALES .....	175
6.1. Criterios de Diseño Generales. Estructuras SUDS .....	176
6.1.1. Características de la cuenca .....	178
6.1.2. Hidrología del sitio.....	179
6.1.3. Infiltración en el suelo (2) .....	179
6.1.4. Selección de la estructura SUDS .....	181
6.1.5. Volumen de almacenamiento de las estructuras SUDS .....	185
6.2. Superficies Permeables.....	191
6.2.1. Recomendaciones de uso.....	193
6.2.2. Dimensionamiento (38) .....	194
6.2.3. Estructura de pavimento .....	199
6.2.4. Mantenimiento.....	199
6.3. Zanjas (31) .....	200
6.3.1. Zanjas de infiltración (38).....	200
6.3.2. Filtración (38).....	205
6.3.3. Biofiltros (38) (31).....	211
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	223
7.1. Estructuras de Captación de Drenaje Urbano Convencional .....	223

7.2. Comparación entre las Estructuras de cCaptación Convencional y no Convencional SUDS. Procedimiento de Diseño.....	224
7.3. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, SUDS. Clasificación .....	227
7.4. Recomendaciones para la implementación de los sistemas SUDS en el drenaje urbano .....	227
8. BIBLIOGRAFÍA .....	229



## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Pendientes transversales recomendadas para pavimentos normales .....	26
Tabla 3.2 Características de las calles urbanas (14).....	29
Tabla 3.3 Valores de frecuencias de diseño y ancho de la zona de esparcimiento recomendados para el diseño del drenaje en vías (8).....	39
Tabla 3.4. Ancho de agua permitido sobre el pavimento para una tormenta menor (14)..	40
Tabla 3.5. Valores de frecuencia de diseño de acuerdo con el uso del suelo (11) .....	41
Tabla 3.6 . Periodos de retorno o grados de protección (17).....	42
Tabla 3.7 Periodos de retorno o grados de protección (18) .....	43
Tabla 3.8. Ancho de esparcimiento superficial admisible (19).....	43
Tabla 3.9. Límites de inundación permisible de cunetas en vías urbanas (20).....	44
Tabla 3.10 Periodos de retorno de diseño (21) .....	44
Tabla 3.11 Estándares de inundación en la calle para un evento de tormenta mayor (100 años) (14) .....	45
Tabla 3.12 Coeficientes de escorrentía típicos en el drenaje urbano (9) .....	49
Tabla 3.13 Coeficientes de rugosidad $n$ de Manning, típicos (9) .....	52
Tabla 3.14 Valores típicos del coeficiente $k$ de interceptación para velocidad contra relación de pendiente (9) .....	53
Tabla 3.15 Valores del coeficiente de Manning ( $n$ ) para canales y tuberías.....	55
Tabla 4.1 Coeficiente de rugosidad de Manning para pavimentos y cunetas (8) (25) .....	85
Tabla 4.2 Comparación entre los factores de obstrucción predichos y observados (26)	108
Tabla 4.3 Velocidad de salpicadura sobre varios tipos de rejillas (13) .....	116
Tabla 5.1 Clasificación de los SUDS (Universidad de Cantabria) (8) (9) .....	143
Tabla 5.2 Clasificación de los SUDS en el Reino Unido (CIRIA) (2).....	147
Tabla 5.3 Clasificación de los SUDS (Michigan) (10) .....	150
Tabla 5.4 Clasificación de los SUDS (California) (11) .....	151
Tabla 5.5 Clasificación de los SUDS (Suráfrica) (12).....	153
Tabla 5.6 Clasificación de los SUDS propuesta por este trabajo .....	157
Tabla 5.7 Tipos de cubiertas verdes (35) .....	161
Tabla 6.1 Fuentes y contaminantes en la escorrentía urbana .....	178
Tabla 6.2 Coeficientes típicos de infiltración (2) .....	180

Tabla 6.3 Selección de estructuras SUDS, de acuerdo con los criterios establecidos en este trabajo.....	183
Tabla 6.4 Valores de coeficiente volumétrico $R_v$ .....	190
Tabla 6.5 Estructura para pavimentos permeables .....	192
Tabla 6.6 Estructura zanja de infiltración. Capas .....	201
Tabla 6.7 Capas de la estructura de la zanja de filtración .....	209
Tabla 6.8 Zanja vegetal (biofiltro). Capas de la estructura .....	213
Tabla 7.1 Comparativo entre las estructuras de captación convencionales y las no convencionales, SUDS .....	224

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Ejemplo de malla vial en una comunidad residencial .....	31
Figura 3.2 Secciones típicas vías locales y recolectoras. (13) .....	32
Figura 3.3. Secciones típicas de vías arterias y autopistas .....	33
Figura 3.4. Secciones típicas de vías rurales y semiurbanas (13).....	33
Figura 4.1 Sección transversal de la calle y área de drenaje .....	65
Figura 4.2 Diagrama de flujo para el diseño del drenaje urbano .....	67
Figura 4.3 Secciones típicas de cuneta. Cunetas tipo A .....	68
Figura 4.4. Secciones típicas de cuneta. Cunetas tipo B .....	69
Figura 4.5 Perfiles sobre la cuneta para un flujo supercrítico .....	73
Figura 4.6 Perfiles sobre la cuneta para un flujo subcrítico. Para $y=H_c$ .....	74
Figura 4.7 Flujo en una cuneta triangular. Sección transversal .....	76
Figura 4.8 Elemento diferencial de área en la cuneta para definir propiedades geométricas .....	77
Figura 4.9 Parámetros hidráulicos de una vía .....	82
Figura 4.10 Cuneta de sección transversal en forma de V .....	83
Figura 4.11 Cuneta con sección transversal circular .....	84
Figura 4.12 Factor de reducción en función del ancho de esparcimiento y el producto $VD$ , para una pendiente longitudinal $S_o = 0,01$ (26).....	91
Figura 4.13 Factor de reducción en función de la pendiente (26).....	92
Figura 4.14 Capacidad hidráulica de la calle.....	93
Figura 4.15 Eficiencia hidráulica de una calle para un caudal dado .....	94
Figura 4.16 Rango de la curva hidráulica de la calle. Descarga vs. Profundidad, para una sección transversal de calle dada .....	95
Figura 4.17 Disposición de entradas en una calle.....	104
Figura 4.18 Sumidero de rejilla .....	109
Figura 4.19 Ubicación de las rejillas (11) .....	111
Figura 4.20 Disposición de las rejillas en la calle (11) .....	111
Figura 4.21 Dimensiones de una rejilla estándar .....	113
Figura 4.22 Parámetros de la calle .....	115
Figura 4.23 Salpicadura en rejillas .....	116
Figura 4.24 Intercepción del esparcimiento en una rejilla sin cordón de andén.....	122

Figura 4.25 Intercepción del esparcimiento en una rejilla con cordón de andén.....	122
Figura 4.26 Determinación de la profundidad de encharcamiento en un sumidero .....	123
Figura 4.27 Profundidad adicional a la profundidad del esparcimiento en la esquina de una calle en una tormenta .....	124
Figura 4.28 Sumidero lateral.....	127
Figura 4.29 Configuración de la garganta de un sumidero lateral .....	134
Figura 4.30 Sumidero combinado .....	137
Figura 4.31 Sumidero ranurado .....	139
Figura 5.1 Clasificación de los SUDS (Universidad de Cantabria) .....	144
Figura 5.2 Clasificación de los SUDS (Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia).....	145
Figura 5.3 Clasificación de los SUDS en el Reino Unido (CIRIA).....	148
Figura 5.4 Clasificación de los SUDS (Michigan) .....	149
Figura 5.5 Clasificación de los SUDS (California) .....	152
Figura 5.6 Clasificación de los SUDS (Suráfrica) .....	154
Figura 5.7 Clasificación de los SUDS (São Paulo y Unicef) .....	155
Figura 5.8 Diagrama de clasificación de los SUDS propuesta por este trabajo.....	158
Figura 5.9 Cubiertas verdes.....	161
Figura 5.10 Superficies permeables.....	162
Figura 5.11 Pozo de infiltración (36) (2) .....	163
Figura 5.12 Estructura de los pozos de inspección .....	164
Figura 5.13 Zanjas de infiltración .....	165
Figura 5.14 Zanjas de filtración.....	166
Figura 5.15 Zanja de filtración.....	166
Figura 5.16 Estructuras de biorretención (a la derecha biofiltro ubicado en una zona residencial, a la izquierda como estructura de captación sobre una vía urbana).....	167
Figura 5.17 Zona de biofiltro en un estacionamiento junto con un sumidero convencional para evitar el desbordamiento del biofiltro.....	168
Figura 5.18 Biofiltros (a la izquierda celda de biorretención de la calle, Los Ángeles CA, a la derecha biorretención de área lineal a lo largo de la carretera) .....	168
Figura 5.19 Cunetas verdes. Cunetas con diques y muros .....	169
Figura 5.20 Franja filtrante .....	170
Figura 5.21 Depósito de infiltración.....	171

Figura 5.22 Esquema de un depósito de infiltración.....	172
Figura 5.23 Depósito de detención (a la izquierda depósito a cielo abierto, a la derecha depósito enterrado).....	173
Figura 5.24 Estanque de retención .....	174
Figura 5.25 Humedal .....	174
Figura 6.1 Criterios generales de diseño.....	177
Figura 6.2 Superficie permeable. Estructura .....	192
Figura 6.3 Dimensionamiento superficie permeable. Planta.....	195
Figura 6.4 Dimensionamiento superficie permeable. Corte A-A' .....	195
Figura 6.5 Zanja de infiltración. Estructura.....	201
Figura 6.6 Zanja de filtración perimetral .....	206
Figura 6.7 Zanja de filtración. Esquema perfil .....	208
Figura 6.8 Zanjas vegetadas. Biorretención.....	211
Figura 6.9 Esquema de zanja vegetal (biofiltro) .....	212
Figura 6.10 Jardín de lluvia.....	214
Figura 6.11 Cuenca de biorretención .....	215
Figura 6.12 Jardines de aguas lluvias.....	215
Figura 6.13 Área extendida de árboles urbanos.....	216

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Problema

En un sistema convencional de drenaje urbano el transporte, la captación y la entrega del agua lluvia al afluente está compuesto por la vía, las cunetas o canales, las entradas (especialmente sumideros) y los colectores. El principal objetivo de este sistema es permitir el paso seguro de los vehículos y los peatones, evacuando lo antes posible y de manera puntual la esorrentía generada por un evento con recurrencia igual a la del periodo de diseño.

El crecimiento de las ciudades y, por ende, el desarrollo urbano no contemplado hace que los actuales sistemas de drenaje convencional o tradicional sean insuficientes. Como se adicionan más zonas impermeables que cambian significativamente el ciclo del agua, la infiltración se reduce, permitiendo que la precipitación se convierta, en su mayoría, en esorrentía superficial que se concentra rápidamente. De acuerdo con estas consideraciones, seguramente el agua pluvial que recibe el sistema sobrepasa su capacidad ocasionando inundaciones y desbordamientos en el casco urbano (1).

Los diseños y captaciones convencionales dirigen el agua lluvia al sistema de drenaje pluvial de manera concentrada y, normalmente, sin permitir su aprovechamiento.

En la bibliografía sobre drenaje no convencional se hace mención a los problemas de calidad del agua lluvia en los sistemas tradicionales. Las actividades humanas generan gran cantidad de contaminantes como sedimentos, aceites, granos, metales, fertilizantes, pesticidas, sales, patógenos y basura, que pueden afectar la salud pública y causar daño ambiental. Esta contaminación proviene de diversos orígenes, razón por la cual se habla de contaminación difusa, dificultando su cuantificación y calificación. Durante la precipitación, los residuos acumulados en la superficie en tiempo seco son arrastrados hasta las captaciones, generando problemas de contaminación en los afluentes y colmatación de las captaciones. (2).

Para mejorar los problemas asociados con el drenaje urbano convencional y proponer soluciones novedosas se vienen introduciendo sistemas de aguas lluvias no convencionales acordes con el desarrollo sostenible. De esta manera, han surgido lo que podría denominarse sistemas no convencionales de drenaje urbano conocidos como sistemas de drenaje sostenible (Sustainable Drainage Systems, SUDS), desarrollo de bajo impacto (Low Impact Development, LID), diseño urbano sensible (Water Sensitive Urban Design, WSUD), mejores prácticas de gestión (Best Management Practices, BMP), entre otros. En la bibliografía de habla hispana se conocen comúnmente como sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

De acuerdo con las definiciones encontradas, estos sistemas buscan especialmente no interferir en el ciclo del agua previo a la urbanización, su objetivo es mitigar los problemas asociados al drenaje urbano convencional, evacuando de manera espacial la escorrentía generada por un evento con recurrencia igual a la del periodo de diseño, minimizando los impactos en el desarrollo urbanístico y maximizando la integración paisajística y los valores sociales y ambientales. Además, estos sistemas proponen un manejo más eficiente del agua lluvia, considerándola un recurso y aprovechándola para reutilización o infiltración al subsuelo, lo cual garantiza un sistema más eficaz y sostenible (3).

Este trabajo se enfoca en la evaluación de las estructuras de captación de los sistemas de drenaje convencional y no convencional, principalmente en su capacidad y su funcionamiento hidráulico, con el fin de determinar la mejor captación para cada caso.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

Realizar un estado del arte sobre estructuras de captación convencional y no convencional del drenaje urbano, identificando tipos, características y criterios de diseño, para establecer ventajas y desventajas, y proponer recomendaciones de uso y criterios de selección.

### 1.2.2. Específicos

- Hacer una revisión técnica de la bibliografía especializada sobre elementos convencionales y no convencionales para la captación del drenaje urbano.
- Identificar tipos, características y criterios de diseño para las captaciones convencionales y no convencionales del drenaje urbano.
- Establecer ventajas y desventajas de cada una de las captaciones convencionales y no convencionales seleccionadas.
- Proponer criterios de selección y recomendaciones de uso de captaciones convencionales y no convencionales para un sistema de drenaje urbano.



## **2. DRENAJE URBANO DE AGUAS LLUVIAS**

### **2.1. Drenaje Urbano. Convencional y no Convencional**

Mediante el transporte y la captación adecuada de las aguas lluvias, un sistema de drenaje urbano busca dos objetivos fundamentales: 1) evitar al máximo posible el daño producido por el agua lluvia a las personas y a las propiedades, y 2) garantizar que las actividades de la vida cotidiana en las poblaciones urbanas se lleven a cabo con normalidad durante un evento de precipitación.

#### **2.1.1. Drenaje urbano convencional**

El sistema de drenaje urbano convencional está diseñado para recoger la escorrentía superficial generada por un evento de lluvia, transportarla a lo largo de la vía o cuneta y descargarla lo más rápidamente posible por una estructura de captación, evitando el riesgo de inundación.

#### **2.1.2. Drenaje urbano no convencional**

El drenaje urbano convencional funciona adecuadamente de acuerdo con los objetivos planteados inicialmente por el sistema; sin embargo, han ido surgiendo otros conceptos de drenaje, que tienen en cuenta objetivos adicionales basados principalmente en el desarrollo sostenible.

Estos objetivos adicionales buscan reducir el volumen de escorrentía producido por zonas impermeables que van apareciendo y que no se han contempladas en el desarrollo de las ciudades, reducir los picos de escorrentía debidos a la captación puntual de las aguas lluvias en los sistemas convencionales y mejorar lo más cerca al sitio de captación la calidad del agua lluvia contaminada por las vías urbanas.

Para cumplir con estos objetivos se han venido desarrollando nuevos sistemas de drenaje urbano, tomando como referencia lo que se denomina sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS).

## 2.2. **Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS). Definiciones**

Para entender el origen de los sistemas de drenaje sostenibles (SUDS) es necesario tener en cuenta las siguientes definiciones.

### 2.2.1. **Definición del término sostenible**

El adjetivo sostenible deriva del latín *sustenerere*, que significa sostener o mantener elevado. Desde el punto de vista ecológico, su significado literal es mantener la base de los recursos naturales.

El concepto “desarrollo sostenible” lo han definido históricamente diferentes organizaciones y encuentros enfocados en el medio ambiente y el desarrollo.

El primer antecedente relevante del término sostenible proviene del campo de la biología, en la década de los sesenta, cuando se estudiaban diversas alternativas para que la tala de bosques y la pesca se mantuvieran dentro de los plazos de renovación de dichas poblaciones.

En las décadas de los sesenta y setenta se acumuló evidencia sobre los problemas ambientales que estaba generando el desarrollo humano, como la contaminación creciente de las ciudades, los impactos sobre los cursos de agua por contaminación difusa o desechos industriales, los problemas debidos al sobreuso de agroquímicos y los riesgos de las centrales nucleares (4).

Debido a la necesidad de precisar el concepto de desarrollo sostenible, la Comisión mundial sobre el medio ambiente y el desarrollo lo definió como “un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las propias”.

De acuerdo con esta definición y reconociendo al agua como un recurso escaso y vulnerable, esencial para la sostenibilidad de la vida, el desarrollo y el ambiente, aparece

un nuevo enfoque de drenaje, el “drenaje sostenible”, que pretende mejorar el drenaje convencional enfocándose en la preservación del ambiente y minimizando los efectos del desarrollo urbano (5).

### **2.2.2. Definición y objetivos de los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS)**

Los SUDS pretenden afrontar de manera integrada el manejo de la escorrentía urbana. Su principal objetivo es controlar la escorrentía superficial en el sitio de origen o fuente, para transportarla y disponerla hacia los afluentes con el mínimo impacto a las personas y al medio ambiente, intentando imitar el ciclo hidrológico del agua previo al desarrollo de la urbanización (6).

De acuerdo con el grupo de Investigación de tecnología de la construcción de la Escuela de caminos, canales y puertos de Santander de la Universidad de Cantabria (7), los objetivos SUDS son los siguientes:

- Proteger y mejorar el ciclo del agua en el área urbana.
- Integrar el tratamiento de las aguas lluvias en el paisaje.
- Proteger la calidad de las aguas afluentes de escorrentías urbanas.
- Reducir los caudales punta que provienen de las zonas urbanizadas mediante elementos de almacenamiento temporal y minimizando las áreas impermeables.

De acuerdo con lo anterior, los SUDS podrían mejorar el manejo de la escorrentía en las ciudades, pero se deben analizar para definir si realmente cumplen con los objetivos propuestos, entre los cuales se debe incluir la evaluación económica.

Como se mencionó, los sistemas de drenaje urbano convencional cumplen con los objetivos propuestos inicialmente, es decir, evacuar lo más rápidamente posible las aguas lluvias de la vía y transportarla hacia el afluente más cercano. Sin embargo, debido al desarrollo de las ciudades, los sistemas actuales de drenaje convencional no tienen la capacidad hidráulica necesaria para evacuar las aguas lluvias, cuya escorrentía ha sido transformada por el desarrollo urbanístico.

Con estas consideraciones, lo ideal sería rediseñar la mayoría de los sistemas de drenaje convencional para drenar adecuadamente las aguas lluvias y continuar con el desarrollo de las ciudades, pero esta solución es costosa y, en muchos casos, inviable económicamente para los constructores o urbanizadores. Por esta razón, es importante adoptar otras alternativas que mejoren los sistemas de captación existentes y eviten inversiones elevadas.

### **3. GUÍAS GENERALES PARA EL DISEÑO DEL DRENAJE URBANO**

En un ambiente urbano las vías hacen parte del sistema de drenaje de aguas lluvias. Ellas proveen importantes y necesarias funciones de drenaje durante un suceso de precipitación; no obstante, su principal propósito es facilitar la circulación del tráfico. Un buen diseño de drenaje urbano puede tener ventajas para la capacidad hidráulica de la calle, como las normas y regulaciones lo permitan. Un uso óptimo de la capacidad hidráulica de la vía puede reducir significativamente el número y el tamaño de las entradas y los colectores de lluvia o, posiblemente, eliminar la necesidad de algún sistema. Las calles hidráulicas están determinadas por configuraciones geométricas y superficies ásperas. La capacidad de una entrada está cercanamente relacionada con las condiciones de flujo en la vía.

En las vías urbanas y rurales, específicamente, los sardineles y cunetas o zanjas al borde de la carretera se consideran parte del sistema menor de drenaje. Cuando el gasto de derrame en la vía excede los límites aceptables se requiere un sistema colector de lluvia o una zanja lateral para transportarlo. Las calles hacen parte del sistema mayor de drenaje porque conducen el mayor gasto de derrame de lluvias cuando se excede la capacidad del sistema menor. Como el principal objetivo de las calles urbanas es permitir la circulación del tráfico, la función de drenaje es secundaria y no debe interferir con la función de tráfico de la calle. El agua que fluye por la vía se debe recoger y conducir rápida y eficientemente a los colectores de lluvia o canales, sin interferir con el desplazamiento de los autos. De acuerdo con estas consideraciones, la función de las calles, como parte del sistema mayor de drenaje, es proveer un corredor de emergencia para un evento con recurrencia mayor al periodo de diseño, con un mínimo daño al ambiente urbano.

El drenaje de una vía se ve afectado por el material del pavimento y su geometría. La ubicación de las estructuras de drenaje puede causar un efecto adverso respecto a la seguridad de la vía.

### 3.1. Características de la Vía

#### 3.1.1. Fenómeno de hidroplaneación (8) (9)

La hidroplaneación ocurre cuando se excede la capacidad de drenaje establecido entre el labrado de la llanta y la superficie del pavimento y, por lo tanto, el agua empieza a acumularse enfrente de la llanta, creando una cuña de agua que produce una fuerza hidrodinámica que la puede levantar de la superficie del pavimento. Se denomina hidroplaneación dinámica total cuando el agua ofrece pequeños esfuerzos de resistencia, la llanta pierde su capacidad tractiva y se pierde el control del vehículo.

Durante este fenómeno se deben considerar los siguientes aspectos: la profundidad del agua, la geometría de la calzada, la velocidad del vehículo, la profundidad del labrado de la llanta, la presión de inflado y las condiciones de la superficie del pavimento.

- ✓ El flujo en lámina (sheet flow) sobre la vía puede ocasionar hidroplaneación y los materiales del pavimento pueden influir en el desarrollo de este fenómeno.
- ✓ Los pavimentos lisos pueden ocasionar flujos de agua más rápidos y reducir el espesor de la película de flujo en lámina; sin embargo, estos pavimentos suaves pueden reducir su coeficiente de fricción con la llanta, causando peligro de accidentalidad.
- ✓ Si la profundidad de la lámina de agua que escurre sobre el pavimento se incrementa, aumenta la posibilidad de hidroplanear.
- ✓ Cuando un vehículo encuentra una película de agua, ésta es conducida a través de los canales del labrado de las llantas y de la rugosidad de la superficie.

Los siguientes son algunos factores de diseño del pavimento para evitar la hidroplaneación:

1. El diseño de la sección transversal de la vía es importante para reducir la longitud de las rutas de drenaje del agua sobre el pavimento. Distribuir el bombeo hacia ambos lados de la vía reparte el flujo y aumenta la pendiente, es mejor que realizar el

bombeo hacia un solo lado. Esta condición puede prevenir la sobre-elevación del espesor del flujo en lámina.

2. Incrementar la rugosidad del pavimento por métodos como el acanalamiento del concreto Pórtland. Aumentar la textura de la superficie incrementa la capacidad de drenaje en la interfase pavimento-llanta.
3. Utilizar pavimentos con relación alta de vacíos (o de tamaño uniforme), los cuales han demostrado que reducen de manera importante el potencial de hidroplaneación en la superficie de rodadura. Esta reducción es el resultado de la capacidad que tiene el agua de ser forzada a través del pavimento bajo la llanta y entrar a la subbase. La textura de la superficie también incrementa el coeficiente de fricción entre la llanta y el pavimento. Cuando se realice el diseño del pavimento la gradación amplia también debe tener en cuenta provisiones para el drenaje de la subbase.
4. Utilizar estructuras de intercepción del drenaje sobre la vía para que capturen la lámina de agua sobre el pavimento, de tal manera que reduzcan el espesor de la película de agua y el potencial de hidroplaneación de la superficie. Esto también se puede lograr con largas entradas ranuradas perpendiculares al flujo y juntas de expansión en los puentes.

### 3.1.2. Pendiente longitudinal (8) (9)

Los valores mínimos recomendados de la pendiente longitudinal establecidos en las normas para el diseño geométrico de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1990) provee seguridad y aceptable drenaje del agua sobre el pavimento. Adicionalmente, se presentan las siguientes guías generales:

1. Una mínima pendiente longitudinal es más importante en un pavimento confinado (entre sardineles) que en un pavimento no confinado, porque en el primero el agua es confinada y en el otro caso corre por la berma cuando la sección es con bombeo hacia los lados.
2. Las pendientes longitudinales para las cunetas no deben ser menores que 0,5% cuando el pavimento se encuentra confinado y tener un valor absoluto mínimo de 0,3%. Las pendientes mínimas se pueden mantener en terrenos planos mediante el

uso de un perfil adecuado para la sección transversal, que se adecúe al perfil de la cuneta.

3. En curvas verticales se puede mantener una pendiente mínima del 0,3% en unos 15 m del punto más bajo de la curva. Esta condición se obtiene si la longitud de la curva en metros, dividida por la diferencia algebraica de las pendientes en porcentaje ( $K$ ), es igual o superior a 50 (156 unidades inglesas), como se presenta en la siguiente ecuación:

$$K = \frac{L}{G_2 - G_1} \quad (3.1)$$

Donde:

$K$  = constante de la curva vertical (m/porcentaje)

$L$  = longitud horizontal de la curva (m)

$G_1$  = pendiente del alineamiento de la vía a un lado del punto de intersección vertical en porcentaje

$G_2$  = pendiente del alineamiento de la vía al otro lado del punto de intersección vertical en porcentaje

### 3.1.3. Pendiente transversal (8) (9) (10) (11)

En la se indican los rangos aceptables para las pendientes transversales (AASHTO, 1990). Estas pendientes son un compromiso entre la necesidad razonable de definir un valor para obtener una pendiente adecuada para el drenaje y una pendiente relativa que garantice comodidad y seguridad al conductor. Las pendientes transversales que se presentan corresponden a los valores estándar prácticos.

Pendientes transversales del 2% tienen poco efecto en el esfuerzo que realiza el conductor en el direccionamiento o en la demanda de una cierta fricción para la estabilidad del vehículo (Galloway et al., 1979). Utilizar una pendiente transversal superior al 2% en pavimentos con una línea central de coronación no es deseable. Sin embargo, en áreas con lluvias intensas, para facilitar el drenaje podría utilizarse un incremento adicional de la pendiente a 2,5%.



En vías con múltiples carriles, donde tres o más de ellos tienen la pendiente en la misma dirección, es aconsejable oponerse al incremento de la profundidad del flujo en lámina, debido al aumento de la sección y de la pendiente de los carriles extremos. Las dos líneas adyacentes a la línea central del bombeo se pueden definir con el bombeo normal, en los sucesivos carriles de par en par, hacia afuera, sus pendientes se pueden incrementar entre 0,5 y 1%. La máxima pendiente transversal se puede limitar al 4% en entretangencias, 8% en peraltes de vías principales y secundarias, y 6% en vías terciarias (10).

A continuación se presentan algunas sugerencias adicionales relacionadas con la pendiente transversal de la vía:

- ✓ Si se garantizan las condiciones, los carriles interiores se pueden pendientar hacia el centro. Esta no es una práctica muy común.
- ✓ Las zonas centrales pueden no drenarse a través de los carriles.
- ✓ En las áreas de transición de pendiente transversal se deben minimizar el número y la longitud de las secciones del pavimento plano. Se debe dar prelación al incremento de pendientes transversales en curvas verticales cóncavas, curvas verticales convexas y en secciones de pendiente horizontal.
- ✓ Las bermas se pueden pendientar para drenar hacia afuera de la calzada, excepto en salientes, estrechamientos o superelevaciones.
- ✓ Donde no es posible cumplir con la recomendación de fijar un punto de coronación, lo que sucede en zonas onduladas o montañosas, se recomienda emplear secciones transversales a una sola agua. Este tipo de secciones sólo es posible en vías locales donde puede admitirse flujo transversal (11).

Las pendientes transversales recomendadas para pavimentos normales se presentan en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Pendientes transversales recomendadas para pavimentos normales**

<i>Tipo de superficie</i>	<i>Rango de la pendiente transversal</i>
<b>Superficie tipo alto</b>	
2 carriles	0.015 – 0.02
3 o más carriles	0.015 mínimo, incrementando 0.005 a 0.010 por carril, 0.04 máximo
<b>Superficie intermedia</b>	0.015-0.030
<b>Superficie tipo baja</b>	0.020-0.060
<b>Bermas</b>	
Bituminosa o concreto	0.020-0.060
Con confinamiento (por ejemplo, sardineles)	≥ 0.040

#### **3.1.4. Intercepciones (11)**

En las intercepciones las obras de drenaje deben ubicarse de manera estratégica y tener la capacidad necesaria para no interferir con las condiciones de operación de éstas.

Otra manera de evitar el flujo transversal y las inundaciones indeseables en las intersecciones es trasladar gradualmente el punto de coronación de la calle y las pendientes transversales para que el flujo longitudinal tome la dirección deseada, de acuerdo con el tipo de calles que se interceptan (la clasificación de las calles se presenta en el numeral 3.1.6).

#### **3.1.5. Seguridad (10) (11) (12)**

Ubicar las estructuras de drenaje a lo largo de la vía puede convertirse en un obstáculo para el desarrollo del tráfico. Las entradas centrales para drenaje de tormentas y uniones necesitan tener una elevación que no sea significativa sobre la superficie de la vía. Las

entradas y salidas de los culverts deben estar situadas por fuera de la trayectoria de los vehículos. Como regla general, el diseño del drenaje debe proveer una condición que no incomode el tráfico.

A continuación se presentan algunas recomendaciones que debe tener en cuenta el diseñador para brindar más seguridad (12):

- ✓ Las obras de drenaje deben tener la capacidad de evitar concentraciones de agua indeseables en la vía, que pueden generar disminución en la velocidad de los vehículos o accidentes por el fenómeno de hidroplaneación.
- ✓ Evitar obras de drenaje dentro de las curvas horizontales de radios cercanos al mínimo por efecto de restricción sobre los conductores, obligándolos a realizar operaciones de frenado súbito.
- ✓ El diseño de obras de captación superficial, como cunetas, debe permitir la conformación de una sección transversal segura y cómoda. Se deben evitar al máximo las secciones hidráulicas que puedan generar la detención de los vehículos y, en algunos casos, su volcamiento ante el evento de que alguno traspase el borde exterior de la berma.
- ✓ Las estructuras de drenaje deben permitir que en condiciones de funcionamiento normal no se presente acumulación de sedimentos ni residuos que propicien su colmatación.
- ✓ En zonas de cruce de peatones se debe tener precaución de que las aguas de escorrentía no afecten su movilidad; por tal razón, las estructuras de captación se deben ubicar aguas arriba de estos cruces.
- ✓ Donde se presenten curvas verticales cóncavas con cambio de signo de las pendientes de entrada y salida, las obras de drenaje deben estar ubicadas de tal manera que se evite la acumulación de agua en la parte más baja de la curva.

### **3.1.6. Configuración típica de las vías urbanas (13) (14)**

En la ingeniería de tráfico, la clasificación del sistema de calles se basa en las principales características geométricas, el volumen de vehículos y el control de las rampas de

acceso. Sin embargo, los ingenieros de drenaje también deben tener en cuenta dicha clasificación porque en la planeación y el diseño del drenaje especial deben considerar el esparcimiento máximo permitido, la profundidad del agua en la cuneta, el bombeo de la calle, los tipos de entradas, etc. De hecho, la circulación del tráfico en un sistema de carretera se puede ver fuertemente afectado por las lluvias y derrames, a tal punto de quedar paralizado. Si el sistema de drenaje de carreteras no está bien planeado y diseñado puede causar que el sistema vial quede degradado a un nivel inaceptable de servicio.

Desde el punto de vista del sistema de transporte de drenaje en vías, las calles se pueden clasificar en urbanas, rurales o semiurbanas. Las urbanas se caracterizan por estar confinadas en sardineles o cordones de acera, cunetas y sumideros captadores de escorrentía superficial. A las calles rurales usualmente se les incorporan lateralmente canales abiertos o zanjas. Mientras que las calles semi-urbanas se diseñan con bermas de concreto poco profundas para transportar el esparcimiento de aguas lluvias sobre la calzada. En términos prácticos, el sistema de calles se podría clasificar de acuerdo con sus dimensiones y uso como local, recolector, principal o autopista, dependiendo del tránsito promedio diario (TPD).

#### 3.1.6.1. ***Calles locales***

Éstas pueden ser residenciales o industriales de tráfico lento. Están diseñadas para proveer servicio local sin interferir el tráfico. Deben tener señales de pare y generalmente se caracterizan por tener dos carriles movibles. Eventualmente cuentan con carriles de parqueo.

#### 3.1.6.2. ***Calles recolectoras***

Están diseñadas como calles internas principales, proveen servicio entre calles locales y arteriales, con velocidad de tráfico de lento a moderado, con señales de pare donde interceptan calles laterales y señales de tráfico donde se encuentran con vías arterias.

Debe haber tres o cuatro carriles de tráfico movibles y se permite el parqueo contiguo a los bordillos de la acera.

### 3.1.6.3. **Calles arteriales**

Las calles arteriales están clasificadas en mayores y menores, con velocidad de tráfico de moderada a alta, pasando a través de áreas urbanas y con acceso a las autopistas. Tienen controlado o limitado el acceso para permitir un eficiente movimiento del tráfico. Deben tener señales de tráfico en las intersecciones mayores y en las intersecciones con otras calles, y cuatro o seis carriles de tráfico. El parqueo contiguo a los bordillos de acera puede estar prohibido.

### 3.1.6.4. **Autopistas**

Las autopistas están diseñadas para un rápido y eficiente movimiento del tráfico. El acceso está controlado con separación de niveles en los intercambios (puentes y orejas). Generalmente usan hasta ocho carriles y el parqueo está prohibido. En la tabla 3.2 se presentan de manera resumida las características de cada una de las clasificaciones de las calles urbanas.

**Tabla 3.2 Características de las calles urbanas (14)**

<b>Clasificación</b>	<b>Función</b>	<b>Ancho/Número de carriles</b>	<b>Señalización e intersecciones</b>	<b>Parqueo</b>
Locales	Proporciona acceso a áreas residenciales o industriales	Ancho, bajo con dos carriles móviles	Señales de pare	Uno o ambos lados de la calle
Recolectoras	Recoge y transporta el tráfico entre las calles locales y arteriales	Ancho, bajo y moderado con dos o cuatro carriles móviles	Señales de pare o de tránsito	Uno o ambos lados de la calle

**Tabla 3.2 (Continuación) Características de las calles urbanas (14)**

<b>Clasificación</b>	<b>Función</b>	<b>Ancho/Número de carriles</b>	<b>Señalización e intersecciones</b>	<b>Parqueo</b>
Arteriales	Funcionan principalmente a través de calles de tráfico en áreas urbanas	Ancho, moderado y alto con cuatro a seis carriles	Señales de tránsito. Control de acceso	Usualmente prohibido
Autopistas	Proporcionan un transporte rápido y eficiente a largas distancias	Ancho, alto con cuatro carriles o más	Cruce en trébol (cloverleafs) y rampas de acceso. Acceso limitado	Siempre prohibido

La figura 3.1 muestra una ilustración esquemática de una red de calles en una comunidad.

Las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 presentan las configuraciones geométricas para calles urbanas, recolectoras, autopistas sin peaje, semiurbanas y rurales.

Las dimensiones corresponden a valores medios y sus valores específicos, en general, dependen de la entidad oficial encargada del manejo de la vía (local, regional o nacional).

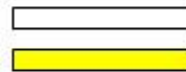


Vía arteria (Av. Pepe Sierra, Av. 13, Av. 19, Av. 15, Calle 100)

Calle recolectora (Calle 106, Calle 104, Diag. 109, Calle 114)

Vía local

Área comercial, residencial y pública



**Figura 3.1. Ejemplo de malla vial en una comunidad residencial.** Fuente: Google maps

En el caso de las vías colombianas yj, en particular, en la ciudad de Bogotá, el subsistema vial está conformado por los siguientes componentes, de acuerdo con la referencia (8):

Malla vial arterial.

Malla vial intermedia.

Malla vial local.

Alamedas y pasos peatonales.

Red de ciclorrutas y corredores de movilidad local.

Malla vial rural.

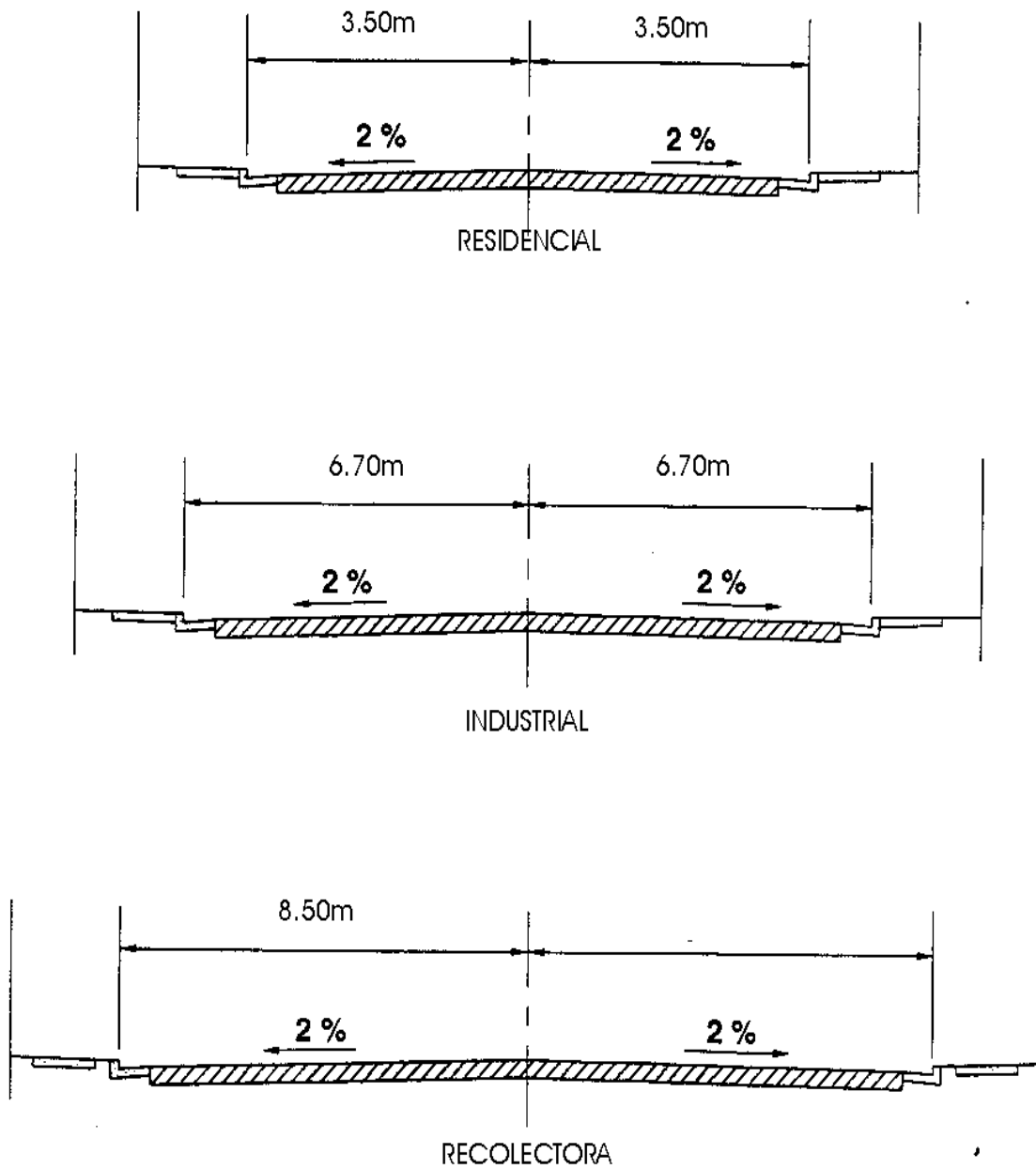


Figura 3.2 Secciones típicas vías locales y recolectoras. (13)



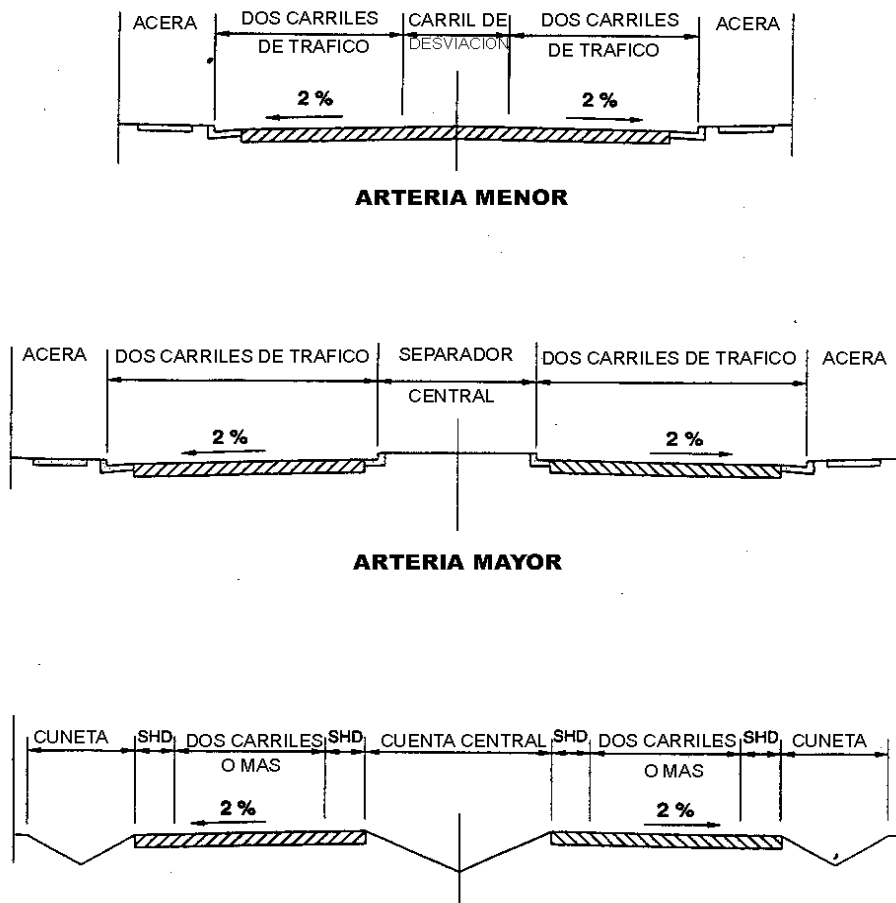


Figura 3.3. Secciones típicas de vías arterias y autopistas

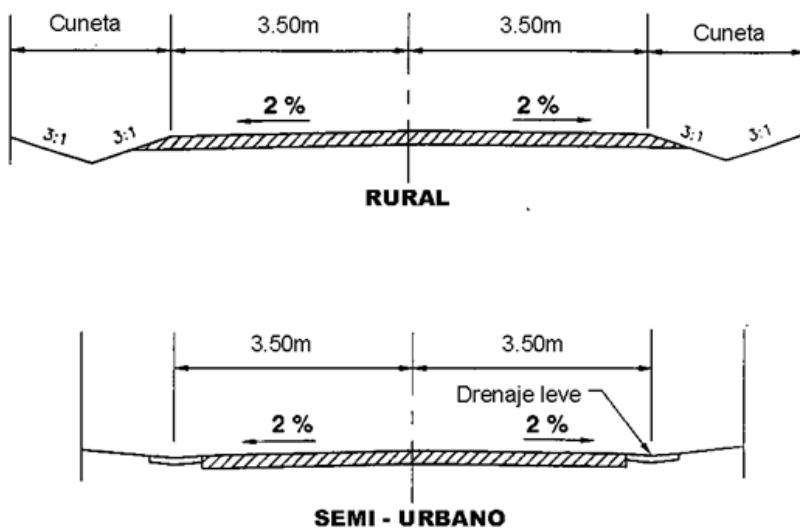


Figura 3.4. Secciones típicas de vías rurales y semiurbanas (13)

El subsistema vial está constituido por cuatro mallas jerarquizadas y relacionadas funcionalmente por las intersecciones generadas por éstas:

- ✓ Malla vial arterial principal. Soporte de la movilidad y accesibilidad metropolitana y regional.
- ✓ Malla vial arterial complementaria. Articula operacionalmente los subsistemas de la malla vial arterial principal. Facilita la movilidad de mediana y larga distancia como articulación a escala urbana.
- ✓ Malla vial intermedia. Está constituida por una serie de tramos viales que conectan la retícula que conforman las mallas arterial principal y complementaria, sirviendo como alternativa de circulación a éstas. Permite el acceso y la fluidez de la ciudad a escala zonal.
- ✓ Malla vial local. Establece el acceso a las unidades de vivienda.

En la clasificación del subsistema vial existe una subclasificación, de acuerdo con las secciones transversales de las vías<sup>1</sup>. Las secciones viales bases son las siguientes:

- Para la malla arterial principal y la malla arterial complementaria: V-0, V-1, V-2 y V-3.
- Para la malla vial intermedia: V-4, V-5 y V-6.
- Para la malla vial local: V-7, V-8 y V-9.

En su uso las vías se diferencian por el tipo de transporte que opera sobre ellas, de la siguiente manera:

- Perfil A: base.
- Perfil B: base, troncal de buses.

---

<sup>1</sup> Decreto 190 de 2004. Artículo 174. Disponible en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=13935>.

- Perfil C: base, metro.

- Perfil D: base, troncal de buses, metro.

Se entiende que la sección base de cualquiera de las anteriores categorías incluye andenes, ciclorrutas y calzadas vehiculares de tráfico mixto.

Los anchos de las vías se establecen en el artículo 158, "Definición y dimensión de las reservas viales", del Decreto 619 de 2000, modificado por el artículo 136 del Decreto 469 de 2003. Los anchos mínimos de las secciones transversales de las vías pertenecientes a las mallas viales arteriales principales, arteriales complementarios, intermedios, locales y rurales, son las siguientes:

Vía V-0:	100 m
Vía V-1:	60 m
Vía V-2:	40 m
Vía V-3:	30 m (en sectores sin desarrollar) 28 m (en sectores desarrollados)
Vía V-3E:	25 m
Vía V-4:	22 m
Vía V-4R:	22 m (en zonas rurales)
Vía V-5:	18 m (para zonas industriales y acceso a barrios)
Vía V-6:	16 m (local principal en zonas residenciales)
Vía V-7:	13 m (local secundaria en zonas residenciales)
Vía V-8:	10 m (pública, peatonal, vehicular restringida)
Vía V-9:	8 m (peatonal)

Los detalles de cada sección transversal se presentan en la referencia (16).

### 3.2. Frecuencias de Diseño y Ancho Máximo de Esparcimiento (8) (9) (14)

Los eventos de lluvia varían mucho en magnitud y frecuencia de ocurrencia. Grandes tormentas producen grandes caudales, pero son muy poco frecuentes. Tormentas menores producen más pequeños caudales, pero ocurren con más frecuencia.

El criterio de diseño mediante un periodo de retorno exige un análisis razonable, ya que aunque se puede diseñar una red para cualquier periodo de retorno, por razones económicas los sistemas de drenaje de aguas lluvias no suelen estar diseñados para el caudal máximo durante eventos de tormenta.

Los sistemas de drenaje de aguas lluvias están diseñados para el caudal máximo de una tormenta de menor importancia (eventos más pequeños), con una mínima interrupción del tráfico. Para lograr esto, la propagación de agua en la calle está limitada a un cierto valor máximo, denominado ancho de esparcimiento máximo, durante el evento de tormenta menor. La magnitud de la tormenta menor está establecida según la normatividad local o por diferentes criterios, habitualmente el sistema se diseña para periodos de retorno de 2, 5 o 10 años, incluso se puede diseñar para periodos de retorno de 25 o 50 años en zonas especiales.

En ocasiones, se producen precipitaciones que superan la magnitud de una tormenta menor. Cuando esto sucede, la dispersión de agua en la calle supera la propagación permisible, presentándose inundaciones e interrupción del tráfico. Sin embargo, un diseño adecuado debe garantizar que la seguridad pública se mantenga y los daños por inundaciones sean mínimos. Por esta razón, la normatividad local a menudo establece para el evento de tormenta un periodo de retorno de 100 años. Para este evento, denominado tormenta de chequeo, la calle se convierte en un canal abierto y se debe analizar para determinar que las consecuencias de la inundación sean aceptables con respecto a los daños y la seguridad pública.

De acuerdo con estas consideraciones, las decisiones más significativas de diseño para el drenaje del pavimento son:

- ✓ La frecuencia de la lluvia de diseño.

- ✓ La cantidad de agua que escurre o se ‘esparce’ sobre el pavimento.

El agua que se esparce sobre el pavimento y la frecuencia de diseño no son independientes. Las implicaciones del uso de un criterio para el ancho de esparcimiento máximo en un carril de tráfico medio son considerablemente diferentes para una frecuencia de diseño dada, que para una frecuencia de diseño menor.

El esparcimiento del agua sobre la vía también tiene diferentes implicaciones cuando el tráfico es bajo y la vía es de baja velocidad, que cuando es de alta velocidad. La compensación del riesgo y la inundación es el resultado del drenaje del pavimento y es una seguridad importante para la vía.

### **3.2.1. Criterios de selección de la frecuencia de diseño: compensación del riesgo (8) (9)**

El objetivo del diseño tormenta-drenaje de una vía es proveer seguridad en el desplazamiento de los vehículos durante una tormenta. El diseño de los sistemas de drenaje para una sección transversal de una vía consiste en recoger la esorrentía en la cuneta o zanja lateral y dirigirla a las entradas o culverts, de tal forma que se provea un razonable grado de seguridad para el tráfico y los peatones a un costo moderado.

Como el escurrimiento sobre las calzadas confinadas por sardineles se incrementa, el riesgo por accidentes de tráfico, averías, molestias y posibles peligros a los peatones también es alto.

La frecuencia de diseño y el ancho de esparcimiento permitido en el diseño implican aceptables riesgos de accidentes, reducción del tráfico y menores costos para los sistemas de drenaje. Los riesgos asociados con el agua sobre los carriles son mayores con altos volúmenes de tráfico, altas velocidades y alta clasificación de las vías, que con menores volúmenes de tráfico, bajas velocidades y una baja clasificación de las vías.

Las principales consideraciones que se deben tener en cuenta en la selección del periodo de retorno y del ancho de esparcimiento máximo son las siguientes:

- ✓ Clasificación de las calles de acuerdo con sus funciones. Funciones altas implican aceptar bajo riesgo, que se traslada a bajos intervalos de recurrencia con periodos de retorno entre 1 y 100 años. Debido a que el represamiento de los carriles de alta velocidad es contrario a las expectativas públicas, los riesgos de accidentes y los costos del tráfico represado son altos.
- ✓ La velocidad de diseño es importante en la selección de criterios de diseño del drenaje (una velocidad superior a 70 km/h y agua sobre el pavimento pueden causar hidroplaneación, en este caso la intensidad de la lluvia es más significativa que el 'esparcimiento' del agua sobre la vía).
- ✓ Los volúmenes de tráfico proyectados son un indicador de la importancia económica de mantener abierta la vía al tráfico. Los costos de oportunidad de pérdida de manejo y tiempos de viaje de los pasajeros asociados con la interrupción del tráfico se incrementan rápidamente con el aumento del volumen de tráfico.
- ✓ La intensidad de la lluvia puede afectar significativamente la selección de la frecuencia de diseño y el esparcimiento. Los riesgos asociados con el esparcimiento de aguas sobre el pavimento pueden ser menores en las zonas áridas, donde se presentan pocas lluvias, ya que están sujetas a aguaceros de más intensidad que en áreas con lluvias más frecuentes, pero donde se presentan precipitaciones menos intensas.
- ✓ Los costos de capital están al otro lado de la ecuación. Las consideraciones de los costos hacen necesario un balance para aproximarse a la selección de los criterios de diseño basados esencialmente en el riesgo: se deben considerar entre los criterios deseables y los practicables necesarios por los costos.

Otras consideraciones incluyen inconvenientes, peligros y molestias al desplazamiento de los peatones, que no se pueden minimizar en algunas locaciones como en las áreas comerciales, donde se debe tener más cuidado.

### 3.2.2. Consideraciones sobre las guías de diseño para frecuencias de diseño y ancho de esparcimiento permitido (8) (9)

La tabla 3.3 contiene las recomendaciones mínimas sobre las frecuencias de diseño y el flujo esparcido sobre el pavimento, con base en el tipo de vía y la velocidad del tráfico, de acuerdo con la referencia (8).

La frecuencia de diseño recomendada para las secciones en pasos bajos, donde la acumulación del agua se puede remover únicamente a través de sistemas de drenaje, es un evento de frecuencia de 50 años.

**Tabla 3.3 Valores de frecuencias de diseño y ancho de la zona de esparcimiento recomendados para el diseño del drenaje en vías (8)**

<b>Clasificación de la vía</b>	<b>Frecuencia de diseño (años)</b>	<b>Esparcimiento (ancho recomendado para el flujo esparcido sobre la vía)</b>
Alto volumen < 70 km/h	10	Berma + 1 m
Dividida > 70 km/h	10	Berma
Bidireccional puntos bajos	50	Berma + 1 m
Recolectoras < 70 km/h	10	½ carril
> 70 km/h	10	Berma
Puntos bajos	10	½ carril
Vías locales bajo TPD	5	½ carril
Alto TPD	10	½ carril
Puntos bajos	10	½ carril

El distrito de Denver, Colorado, en su Manual de drenaje urbano (14) estableció unos valores estándar para el ancho de esparcimiento máximo para un periodo de retorno de inundación dado (tormenta menor), como se presenta en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4. Ancho de agua permitido sobre el pavimento para una tormenta menor (14)**

<b>Clasificación de las calles</b>	<b>Máximo ancho de agua permitido</b>
Locales	El sardinel no puede desbordarse. El flujo puede extenderse hasta la corona de la calle.
Recolectoras	El sardinel no puede desbordarse. El ancho del flujo debe dejar libre de agua por lo menos un carril.
Arteriales	El sardinel no puede desbordarse. El ancho del flujo debe dejar, por lo menos, un carril libre de agua en cada dirección, pero no deben inundarse más de dos carriles en cada dirección.
Autopistas	No se permite la inundación de los carriles de tránsito.

También es una práctica común delimitar la frecuencia de diseño de acuerdo con el uso del suelo, además del criterio del tipo de vía, lo cual es importante en las grandes ciudades. El tipo de uso del suelo debe determinarse con flexibilidad, pues su aplicación estricta puede llegar a una subdivisión excesiva de las áreas urbanas y complicar innecesariamente la fijación de los periodos de retorno. Por esta razón, cuando se menciona el tipo de suelo debe tenerse en cuenta el uso dominante en el área (11).

De acuerdo con el uso del suelo basadas en referencias estadounidenses, la frecuencia de diseño se presenta en la tabla 3.5.

Esta tabla debe emplearse como complemento de las que asignan el periodo de retorno de diseño únicamente de acuerdo con la clasificación de la vía. Una vez establecidos estos periodos de retorno debe comprobarse la frecuencia de diseño asignada por el uso del suelo y utilizar la más alta para cada caso.



**Tabla 3.5. Valores de frecuencia de diseño de acuerdo con el uso del suelo (11)**

<b>Tipo de uso</b>	<b>Frecuencia de diseño (años)</b>
Zonas de actividad comercial	10
Zonas de actividad industrial	10
Zonas de edificios públicos	10
Zonas residenciales multifamiliares de alta densidad	5
Zonas residenciales unifamiliares y multifamiliares de baja densidad	2
Zonas recreativas de alto valor e intenso uso por el público	2
Otras áreas recreativas	1

En las normas colombianas como el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000), la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB) y las Empresas Públicas de Medellín (EPM), la frecuencia de diseño para el sistema de drenaje de aguas lluvias se establece de acuerdo con el periodo de diseño de la red de drenaje pluvial, tomando en cuenta que éste es un sistema integral entre el sistema superficial y los colectores.

La selección del periodo de retorno está asociada, entonces, con la ocurrencia de eventos de precipitación, las características y la importancia del área de estudio, los costos de construcción, de operación y de reparación de daños, los perjuicios y las molestias causados por las posibles inundaciones que afectan a los habitantes, al tráfico vehicular, al comercio, a la industria, entre otros. En todo caso, la normatividad colombiana exige justificar el valor adoptado. Si no se hace un estudio tomando en cuenta las anteriores características cada normatividad presenta unos valores recomendados, como los que se presentan a continuación.

### 3.2.3. Periodos de retorno o grados de protección recomendados por el RAS 2000

En la tabla 3.6 se presentan los periodos de retorno recomendados por el RAS 2000 para el diseño de sistemas de drenaje de aguas lluvias.

**Tabla 3.6 . Periodos de retorno o grados de protección (17)**

<b>Características del área de drenaje</b>	<b>Mínimo (años)</b>	<b>Aceptable (años)</b>	<b>Recomendado (años)</b>
Tramos iniciales en zonas residenciales con áreas tributarias menores de 2 ha	2	2	3
Tramos iniciales en zonas comerciales o industriales, con áreas tributarias menores de 2 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias entre 2 y 10 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores de 1000 ha	5	5	10
Canales abiertos en zonas planas y que drenan áreas mayores de 1000 ha*	10	25	25
Canales abiertos en zonas montañosas (alta velocidad) o a media ladera, que drenan áreas mayores a 1000 ha	25	25	50

\*Parte revestida a 10 años, mas borde libre a 100 años.

### 3.2.4. Periodos de retorno o grados de protección recomendados por la EAB

De acuerdo con la normatividad de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB) y teniendo en cuenta las características del área de drenaje, los periodos de retorno se muestran en la tabla 3.7.

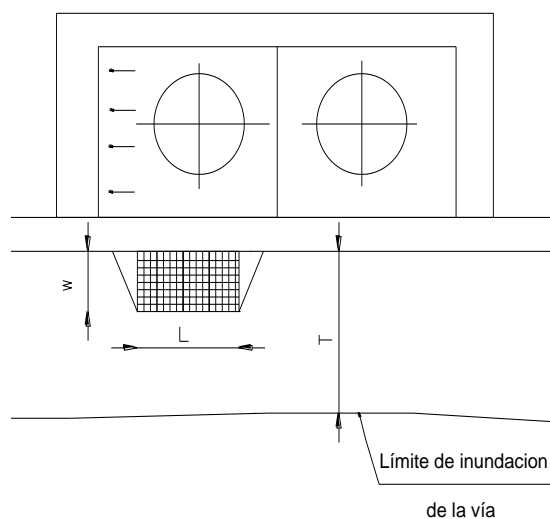
**Tabla 3.7 Periodos de retorno o grados de protección (18)**

Características del área de drenaje	Periodo de retorno
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias hasta de 3 ha, localizados en la zonas de los cerros o en zonas donde la pendiente longitudinal de las vías sea mayor del 1%	3
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias hasta de 3 ha, localizadas en las zonas bajas o en las zonas donde la pendiente longitudinal de las vías es menor del 1%	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores de 3 ha	5
Canalizaciones abiertas, adecuación de cauces de ríos y quebradas en cualquier zona, con áreas tributarias hasta de 1000 ha	10

El ancho de inundación por escorrentía T permisible está en función del tipo de vía y del tráfico vehicular y peatonal esperado, como se muestra en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8. Ancho de esparcimiento superficial admisible (19)**

Clasificación de la vía	Ancho de esparcimiento superficial admisible T(m)
Zona residencial	2
Zona institucional y comercial	1,5
Vías tipo V-0 a V-3	1,5



En la norma para el diseño de cunetas NS-057, la EAB presenta en función de las características de drenaje en la vía el límite permisible de la zona inundable y su respectiva frecuencia de diseño, de acuerdo con el tipo de vía (tabla 3.9).

**Tabla 3.9. Límites de inundación permisible de cunetas en vías urbanas (20)**

Características del drenaje	Límite permisible de la zona inundable	Frecuencia de la lluvia de diseño (años)		
		Vías rápidas	Avenidas	Calles
Sardinell, cunetas	Un metro y medio del ancho de la calzada	15	10	10
Sumideros ubicados en puntos bajos y depresiones	Un metro y medio del ancho de la calzada	50	25	15
Sumideros de rejilla vertical en isleta central	Un metro del ancho de la calzada	15	10	NA

NA: no aplica.

### 3.2.5. Periodos de retorno o grados de protección recomendados por la EMP

La normatividad de las Empresas Públicas de Medellín (EPM) presenta el periodo de retorno de acuerdo con las características del área de drenaje (tabla 3.10).

**Tabla 3.10 Periodos de retorno de diseño (21)**

Características del área	Periodo de retorno (años)
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias menores de 10 ha	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores o iguales de 10 ha	10
Canales abiertos en zonas planas que drenen áreas mayores de 1000 ha	100
Canales abiertos en zonas montañosas o a media ladera que drenan áreas mayores de 1000 ha	100

### 3.2.6. Tormenta de chequeo (9) (14)

La tormenta de chequeo se puede utilizar cuando la escorrentía ocasiona inaceptables inundaciones durante eventos de menor frecuencia. Adicionalmente, las entradas siempre se pueden evaluar para una tormenta de chequeo cuando una serie de ellas terminan en

curvas verticales cóncavas, en las que un potencial almacenamiento produce profundidades peligrosas. La frecuencia seleccionada para la tormenta de chequeo se puede basar en las mismas consideraciones que se utilizan para seleccionar la tormenta de diseño; por ejemplo, las consecuencias del escurrimiento de exceso escogido para el diseño y el potencial de encharcamiento. En los sitios donde no existe posibilidad de encharcamiento, por lo general, la tormenta de chequeo resulta innecesaria. El criterio que generalmente utiliza el HEC 22 para el escurrimiento durante la tormenta de chequeo es suponer un carril libre para el tráfico o un carril sin escurrimiento.

En la tabla 3.11 se presentan algunos estándares de inundación de la calle para la tormenta de chequeo, de acuerdo con el tipo de clasificación de las vías recomendados por el Manual de drenaje de Denver, Colorado.

**Tabla 3.11 Estándares de inundación en la calle para un evento de tormenta mayor (100 años) (14)**

Clasificación de la calle	Altura máxima y área de inundación
Locales y recolectoras	<p>Las viviendas residenciales y los edificios públicos, comerciales e industriales no deben estar a una altura menor de 30,5 cm o 12 pulgadas por encima de la altura de inundación de 100 años en el nivel del suelo o más baja que permita la entrada del agua.</p> <p>La profundidad del agua sobre la cuneta no debe exceder los 45,7 cm o 18 pulgadas.</p>
Arteriales y autopistas	<p>Las viviendas residenciales y los edificios públicos, comerciales e industriales no deben estar a una altura menor de 30,5 cm o 12 pulgadas por encima de la altura de inundación de 100 años en el nivel del suelo o más baja que permita la entrada de agua.</p> <p>La profundidad del agua no debe exceder la corona de la calle para permitir el funcionamiento de los vehículos de emergencia.</p> <p>La profundidad del agua sobre la cuneta no debe exceder los 30,5 cm o 12 pulgadas.</p>

### 3.3. Estudios Hidrológicos. Estimación de Caudales (9) (18) (21) (22)

En vías urbanas, en general, las áreas de drenaje típicas son pequeñas y los caudales de diseño se obtienen a partir de la intensidad de la lluvia de diseño.

La mayor parte de las áreas de drenaje se definen a partir de la infraestructura urbana y su desarrollo, por medio de las vías (calles, carreras, transversales y diagonales), y del tipo de edificaciones, según su desarrollo sea vertical u horizontal.

Otro factor importante en la definición de las áreas de drenaje es el manejo de la escorrentía que cae sobre las áreas de drenaje, para lo cual se debe tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ En un desarrollo horizontal toda el agua precipitada en una estructura urbana o manzana se drena a la vía y, por lo tanto, es la encargada de su transporte y encauzamiento a la recolección.
- ✓ En un desarrollo vertical toda el agua precipitada se recoge parcial o totalmente en el área de drenaje y se entrega directamente a la red de aguas lluvias. En este caso, el área de drenaje no se tiene en cuenta para la estimación de los caudales de diseño del sistema de drenaje de la vía.

En el diseño y estudio hidrológicos de las cuencas asociadas con el drenaje urbano se deben tener en cuenta los efectos de la urbanización relacionados con el potencial de inundaciones en pequeñas cuencas urbanas. Estos efectos incluyen en los hidrogramas de crecientes incrementos en los volúmenes totales de escorrentía y en los caudales picos. En general, los mayores cambios de los caudales en las cuencas urbanas se deben a los siguientes factores:

- ✓ El volumen de agua disponible para la escorrentía aumenta debido al incremento de las zonas impermeables, producto de los parqueaderos, las calles y los techos, que reducen la cantidad de infiltración.

- ✓ Los cambios en la eficiencia hidráulica asociados con canales artificiales, cunetas y sistemas de recolección de drenaje de tormentas, que aumentan la velocidad del flujo y la magnitud de los picos de creciente.

### 3.3.1. Cálculo del caudal de diseño (8) (9)

A continuación se presentan tres métodos para estimar el caudal de diseño, con base en la selección de una intensidad máxima de la lluvia para las condiciones de una cuenca:

- a. Método racional –  $t_c - T_r$ .
- b. Método que previene la hidroplaneación.
- c. Método visión-reducción manejo.

El primer método es explícito y utiliza parámetros establecidos para el cálculo del drenaje utilizando la fórmula racional, como el tiempo de concentración,  $t_c$ , y el periodo de retorno,  $T_r$ . Los otros dos métodos consideran la seguridad del vehículo directamente desde el punto de vista de la hidroplaneación, como la pérdida de visión y de manejo, producido por las fuertes lluvias.

Todos los métodos de diseño consideran la selección del esparcimiento como un requerimiento para el diseño. El primer método envuelve el periodo de retorno y los métodos dos y tres seleccionan la intensidad de la lluvia basados en los límites físicos del vehículo y de la visión del conductor. En estos dos casos, la frecuencia de diseño se atribuye a los límites físicos más que al estudio y al análisis, o a la política prevaleciente.

#### 3.3.1.1. Método racional (8) (9)

La ecuación que se emplea más comúnmente para el cálculo del caudal pico de pequeñas áreas asociadas con el drenaje de vías es un simple balance de masas, que se considera válida para áreas inferiores a 0.8 km<sup>2</sup> (ASCE, 1992) y se conoce como la fórmula racional.

$$Q = \frac{CIA}{K_c} \quad (3.2)$$

Donde:

$Q$  = caudal en  $m^3/s$

$C$  = coeficiente de escorrentía, volumen de flujo / lluvia caída, adimensional

$I$  = intensidad de la lluvia,  $mm/h$

$A$  = área de drenaje,  $km^2$

$K_c$  = 3.6 factor de conversión de unidades

En la ecuación anterior se establecen las siguientes consideraciones:

- ✓ El caudal pico ocurre cuando toda el área contribuye con el flujo.
- ✓ La intensidad de la lluvia es uniforme en un tiempo igual al de la concentración de la hoya. El tiempo de concentración es el que requiere el agua para viajar desde el sitio más alejado al punto en consideración.
- ✓ El caudal pico tiene una frecuencia igual a la de la intensidad de la lluvia, es decir, una lluvia con una frecuencia dada produce un caudal pico con la misma frecuencia.

#### - **Área de drenaje (8) (9)**

El origen de las áreas de drenaje está dado por la infraestructura urbana y su desarrollo, por las vías y el tipo de edificaciones. Esta área se define de acuerdo con el punto donde se recoge la escorrentía, sumidero o estructura de captación, la heterogeneidad de la superficie respecto a vías, techos, jardines, parques, etc., y por el recorrido de la escorrentía a través de las superficies o las conducciones.

#### - **Coeficiente de escorrentía (8) (9)**

La selección del coeficiente de escorrentía  $C$ , en general, se puede realizar de acuerdo con la cobertura (uso de la tierra) del suelo, tomando como referencia los valores que se presentan en la tabla 3.12.



Si el área de estudio tiene varios tipos de cobertura se puede calcular un coeficiente compuesto o ponderado utilizando el peso de cada área, de la siguiente manera:

$$C = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i} \quad (3.3)$$

Donde el subíndice  $i$  corresponde a los valores designados para los diferentes tipos de terrenos. Las zonas de derecho de vías generalmente tienen coeficientes de escorrentía superiores a 0.5, debido a las características de cobertura del pavimento. En la tabla 3.12 se presentan coeficientes de escorrentía típicos de drenaje, de acuerdo con la referencia (9).

**Tabla 3.12 Coeficientes de escorrentía típicos en el drenaje urbano (9)**

Tipo de drenaje	Coeficiente de escorrentía
<b>Comercial</b>	
Áreas interiores	0.70 - 0.95
Áreas vecinas	0.50 - 0.70
<b>Residencial</b>	
Áreas unifamiliares	0.30 - 0.50
Unidades múltiples, juntas	0.40 - 0.60
Unidades múltiples, separadas	0.60 - 0.75
Suburbana	0.25 - 0.40
Áreas de apartamentos	0.50 - 0.70
<b>Industrial</b>	
Zonas livianas	0.50 - 0.80
Zonas pesadas	0.60 - 0.90
<b>Parques, cementerios</b>	0.10 - 0.25
<b>Zonas infantiles</b>	0.20 - 0.40
<b>Zonas ferroviarias</b>	0.20 - 0.40
<b>Zonas descubiertas</b>	0.10 - 0.30

**Tabla 3.12 (Continuación) Coeficientes de escorrentía típicos en el drenaje urbano (9)**

<b>Tipo de drenaje</b>	<b>Coefficiente de escorrentía</b>
<b>Zonas abiertas con césped</b>	
Plano, 2%, suelo arenoso	0.05 - 0.10
Medio, 2-7%, suelo arenoso	0.10 - 0.15
Fuerte, 7%, suelo arenoso	0.15 - 0.20
Suelos pesados, plano, 2%	0.13 - 0.17
Suelos pesados, medio, 2-7%	0.18 - 0.22
Suelos pesados, fuerte, 7%	0.25 - 0.35
<b>Calles</b>	
Asfalto	0.70 - 0.95
Concreto	0.80 - 0.95
Ladrillo	0.70 - 0.85
<b>Calzadas y caminos</b>	0.75 - 0.85
<b>Techos</b>	0.75 - 0.95

- **Determinación de la intensidad de la lluvia para el método racional (8) (9)**

Uno de los primeros pasos que se debe seguir en los proyectos de diseño hidrológico, como el de sistemas de drenaje urbano, es la determinación de los eventos de lluvia que deben emplearse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre la relación entre la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados para la obra o el sitio. Las curvas IDF (intensidad, duración, frecuencia) son necesarias para seleccionar la intensidad de la lluvia por el método racional. Estas curvas existen, en muchos casos, estandarizadas, disponibles para un determinado sitio.

En nuestro país se ha avanzado recientemente en disponer de las curvas IDF regionalizadas. Teniendo en cuenta que en los libros de hidrología se explican extensamente, en este trabajo no se incluye la metodología de cálculo para su estimación.

El método racional supone que la duración de la lluvia, que desarrolla el máximo caudal para una intensidad dada, es igual al tiempo de concentración,  $t_c$ , definido como el tiempo que demora una gota de agua en caer desde el punto más alejado de la cuenca hasta la sección de control. En estas condiciones es necesario calcular el tiempo de concentración como la suma de los tiempos de viaje de las gotas que se mueven siguiendo cierta ruta: sobre la tierra o flujo en lámina, flujo superficial poco profundo, flujo en la cuneta, etc.

- **Estimación del tiempo de concentración (9)**

**a. Tiempo de viaje del flujo en lámina**

El flujo en lámina es la escorrentía de una masa poco profunda sobre una superficie plana, con profundidad uniforme sobre la superficie en pendiente. Esto generalmente ocurre al inicio de la escorrentía, en la cabecera de la cuenca, en una corta distancia, no más de 90 m y posiblemente menor de 25 m.

El flujo en lámina normalmente se estima utilizando una versión de la ecuación de la onda cinemática, una derivación de la ecuación de Manning.

$$T_s = \frac{K_c}{l^{0.4}} \left( \frac{nL}{\sqrt{S}} \right)^{0.6} \quad (3.4)$$

Donde:

$T_s$  = tiempo de viaje del flujo en lámina, minutos

$n$  = coeficiente de rugosidad (tabla 3.13)

$L$  = longitud del flujo, m

$l$  = intensidad de la lluvia, mm/h

$S$  = pendiente de la superficie, m/m

$K_c$  = coeficiente empírico, 6.943

En la expresión anterior  $T_s$  se obtiene mediante un proceso iterativo, porque  $l$  depende de  $T_s$  y se desconoce inicialmente. Es necesario asumir un  $T_s$  para calcular  $l$  de las curvas IDF. Con el valor de  $l$  se va a la ecuación y se calcula  $T_s$ , que debe ser igual al supuesto. En caso contrario, se debe repetir el proceso. En otros casos, para la escorrentía se calcula primero la velocidad y luego se determina el tiempo de viaje, dividiendo la longitud sobre la velocidad.

**Tabla 3.13 Coeficientes de rugosidad  $n$  de Manning, típicos (9)**

Descripción de la superficie	$n$
Asfalto suave	0.011
Concreto suave	0.012
Concreto de revestimiento	0.013
Madera	0.014
Ladrillo con mortero	0.014
Arcilla vitrificada	0.014
Hierro fundido	0.015
Tubería metálica corrugada	0.024
Superficie en mampostería de cemento	0.024
Barbecho (no residuo)	0.05
Suelos cultivados	
Cobertura vegetal $\leq 20\%$	0.06
Cobertura vegetal $> 20\%$	0.17
Pasto	0.13
Pasto	
Pasto corto, pradera	0.15
Pasto denso	0.24
Pasto Bermuda	0.41
Maderas	
Madera ligera	0.40
Madera densa	0.80

### b. Tiempo de viaje en condiciones de flujo concentrado

Después de las cortas distancias (alrededor de 90 m) definidas en el párrafo anterior, el flujo en lámina tiende a concentrarse en pequeños canales y se va incrementando proporcionalmente. Éste se conoce como flujo concentrado. Su velocidad se puede estimar utilizando una relación entre velocidad y pendiente, así:

$$V_c = kS_p^{0.5} \quad (3.5a)$$

$V_c$  = velocidad, m/s

$k$  = coeficiente de interceptación (tabla 3.14)

$S_p$  = pendiente longitudinal, %

El tiempo de viaje en condiciones de flujo concentrado se calcula de la siguiente manera:

$$T_{FC} = \frac{L}{60V_c} \quad (3.5b)$$

$T_{FC}$  = tiempo de viaje en flujo concentrado, minutos

$L$  = longitud del tramo en la que se desarrolla el flujo, m

$V_c$  = velocidad, m/s

**Tabla 3.14 Valores típicos del coeficiente  $k$  de interceptación para velocidad contra relación de pendiente (9)**

Cobertura del suelo / Régimen de flujo	k
Bosque con cobertura (hojarasca) pesada; prado de heno (plano superficial)	0.076
Barbecho o cultivo incipiente	0.152
Bosque, pasto	0.213
Cultivos en filas rectas	0.274
Poco destruido y no cultivado	0.305
Canal con hierba	0.457
Sin pavimentar (flujo poco profundo)	0.491
Zona pavimentada (flujo poco profundo)	0.619

### c. Tiempo de viaje del flujo en la cuneta (9)

Para encontrar el tiempo de flujo en la cuneta se estima el promedio de velocidad en un tramo de ésta. El tiempo de flujo en un canal triangular con flujo uniforme por unidad de longitud se puede estimar adecuadamente utilizando una velocidad media de flujo en cuneta, de la siguiente manera:

$$V_g = \frac{k_c}{n} S_o S_x^{0.67} T^{0.67} \quad (3.6a)$$

Donde:

$V_g$  = velocidad, m/s

$k_c = 0.752$

$S_o$  = pendiente longitudinal, m/m

$S_x$  = pendiente transversal, m/m

$T$  = ancho de esparcimiento permitido por el sobre la calzada (m) (ver valores recomendados)

$n$  = coeficiente de Manning (en general, se recomienda un valor de 0.016 para la superficie de la cuneta)

El tiempo de viaje de flujo en la cuneta se calcula de la siguiente manera:

$$T_g = \frac{L}{60V_g} \quad (3.6b)$$

$T_g$  = tiempo de viaje de flujo en la cuneta, minutos

$L$  = longitud de la cuneta en la que se desarrolla el flujo, m

### d. Tiempo de viaje de flujo en canales y tuberías

La ecuación de Manning se puede emplear para determinar la velocidad media en tuberías y canales abiertos, y a partir de ésta establecer el tiempo de viaje de la escorrentía en este sistema de drenaje.

$$V_p = \frac{C_o}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (3.7a)$$

Donde:

$n$  = coeficiente de rugosidad, de acuerdo con la tabla 3.15

$C_o$  = coeficiente de unidades, para el sistema SI  $C_o=1$  o USC=1.49

$V_p$  = velocidad media en calanes y tuberías, m/s

$R$  = radio hidráulico, m

$S$  = pendiente longitudinal del canal, m/m

El tiempo de viaje del flujo en canales y tuberías se calcula de la siguiente manera:

$$T_p = \frac{L}{60V_g} \quad (3.7b)$$

$T_p$  = tiempo de viaje en canales y tuberías, minutos

$L$  = longitud del tramo en el que se desarrolla el flujo, m

**Tabla 3.15 Valores del coeficiente de Manning (n) para canales y tuberías**

Fuente: Jennings et al., 1994.

Material de conducto	n de Manning
<b>Conductos cerrados</b>	
Tubería asbesto - cemento	0.011 - 0.015
Ladrillo	0.013 - 0.017
Tubería de hierro fundido	0.011 - 0.015
Concreto (monolítico)	0.012 - 0.014
Tubería de concreto	0.011 - 0.015
Tubería plástica (suave)	0.011 - 0.015
<b>Arcilla vitrificada</b>	
Tubería	0.011 - 0.015

**Tabla 3.15 (Continuación) Valores del coeficiente de Manning (n) para canales y tuberías**

Fuente: Jennings et al., 1994.

<b>Material de conducto</b>	<b>n de Manning</b>
Laminado	0.013 - 0.017
<b>Canales abiertos</b>	
Canales rectos	0.013 - 0.017
Asfalto	0.012 - 0.018
Ladrillo	0.011 - 0.020
Concreto	0.020 - 0.035
Enrocado	0.030 - 0.40
Vegetal	
<b>Canales excavados o dragados</b>	
Tierra, rectos y uniformes	0.020 - 0.030
Tierra, sinuoso, bastante uniforme	0.025 - 0.040
Roca	0.030 - 0.045
Sin mantenimiento	0.050 - 0.14
<b>Canales naturales</b>	
(corrientes menores, ancho superior < 30 m)	
Sección regular	0.03 - 0.07
Sección irregular con fosos	0.03 - 0.10

**e. Estimación del tiempo total de viaje en el movimiento combinado de la escorrentía, de acuerdo con su zona de desarrollo**

El tiempo de viaje total se puede calcular de la siguiente manera:

$$T_c = T_s + T_i \quad (3.8)$$



$T_c$ = tiempo de concentración, minutos

$T_i$ = tiempo de viaje, minutos ( $T_{FC}, T_g$  ó  $T_p$ )

**f. Otros métodos para calcular el tiempo de concentración sobre la superficie (15)**

✓ Método de Kirpich (1940)

Desarrollado a partir de información del Soil Conservation Service (SCS), sobre siete cuencas bien definidas con pendientes de 3 a 10%.

$$t_{cs} = 0.01947 \left( \frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (3.9)$$

Donde:

$t_{cs}$ = tiempo de concentración sobre la superficie, minutos

L= longitud del cauce, m

S= pendiente media de la cuenca, m/m

Para flujos superficiales sobre concreto o asfalto el tiempo de concentración  $T_{cs}$  debe multiplicarse por 0.4. Para canales de concreto por 0,3. Para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo en cunetas no debe realizarse ningún ajuste.

✓ Método de California Culverts Practice (1942)

Esta ecuación se desarrolló partir de la ecuación de Kirpich para pequeñas cuencas montañosas de California:

$$t_{cs} = 0.0195 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (3.10)$$

Donde:

$t_{cs}$ = tiempo de concentración sobre la superficie, minutos

L= longitud del curso de agua más largo, m

H= diferencia de nivel entre la divisoria de aguas arriba y la de salida, m

✓ Método de Izzard (1946)

Ecuación diseñada experimentalmente en laboratorio por el Bureau of Public Roads para flujo superficial en caminos y áreas con césped:

$$t_{cs} = \frac{525 (0.000276 * I + c)L^{0.33}}{S^{0.333} I^{0.667}} \quad (3.11)$$

Donde:

$t_{cs}$ = tiempo de concentración sobre la superficie, minutos

L= longitud de la trayectoria del flujo, m

c= coeficiente de retorno

S= pendiente de la trayectoria de flujo, m/m

I= intensidad de la lluvia, mm/h

Los valores del coeficiente de retorno varían desde 0.0070 para pavimentos muy lisos hasta 0.012 para pavimentos de concreto, y 0.06 para superficies densamente cubiertas de pasto.

La solución requiere un proceso iterativo, debido a que no se conocen la intensidad ni el tiempo de concentración. El producto I por L debe ser menor o igual a 3800.

✓ Método de la onda cinemática Morgali y Linsley (1965), Argon y Erboge (1973)

Ecuación para flujo superficial desarrollada a partir del análisis de onda cinemática de la escorrentía superficial:

$$t_{cs} = \frac{7L^{0.6}n^{0.8}}{I^{0.4}S^{0.3}} \quad (3.12)$$

Donde:

$t_{cs}$ = tiempo de concentración sobre la superficie, minutos

L= longitud del flujo superficial, m  
n= coeficiente de rugosidad de Manning  
S= pendiente promedio del terreno, m/m  
I= intensidad de la lluvia, mm/h

Este método requiere un proceso iterativo, debido a que no se conocen la intensidad ni el tiempo de concentración.

✓ Método de la ecuación de retardo SCS (1973)

Ecuación desarrollada por el Soil Conservation Service (SCS), a partir de información de cuencas de uso agrícola. Se ha adaptado a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 800 ha:

$$t_{cs} = \frac{0.0136 L^{0.8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{S^{0.5}} \quad (3.13)$$

Donde:

$t_{cs}$ = tiempo de concentración sobre la superficie, minutos

L= longitud mayor de la trayectoria del flujo, m

CN= número de curva de escorrentía o número de clasificación del suelo SCS

S= pendiente promedio del terreno, m/m

De acuerdo con los resultados experimentales, se ha establecido que es confiable cuando el área se encuentra completamente pavimentada. Para áreas mixtas tiende a la sobreestimación. En canales e impermeabilización de superficies se aplican factores de ajuste para corregir efectos de mejoras.

- Determinación de las Intensidades de la Lluvia

Una vez se ha determinado  $T_c$  (tiempo de concentración) se asume que éste es igual a la duración de la lluvia. Utilizando el método racional, la selección del periodo de retorno

permite disponer de una lluvia asociada a estas dos condiciones (tiempo de concentración y periodo de retorno), que se determina empleando las curvas IDF. La intensidad que se obtiene es la que se utiliza en la fórmula racional.

### 3.3.1.2. **Método de la hidroplaneación (9)**

HEC-21 (Hydraulic Engineering Circular - 21) desarrolló un método alternativo que no depende de la frecuencia para seleccionar la intensidad de las lluvias (obsérvese que una vez se selecciona una intensidad implica una frecuencia). Este método supone que si el conductor tiene una sensación de hidroplaneación para la velocidad de diseño (más un valor razonable permitido) reduce la velocidad por debajo de la permitida para la operación a un valor límite o inferior a este, y esta condición gobierna el funcionamiento de la vía más que la reacción del tráfico a la creciente que se presenta en la cuneta.

Este método selecciona los valores de velocidad del vehículo, la profundidad del labrado de la llanta, la textura del pavimento, la presión de las llantas y calcula el espesor de la lámina o película que desarrollaría una hidroplaneación incipiente.

La ecuación empírica para la velocidad del vehículo que inicia hidroplaneación es:

$$V = K_1 S D^{0.04} (K_2 P)^{0.3} [(K_3 T D) + K_3]^{0.06} A \quad (3.14)$$

Donde A= curva de ajuste de la Texas Transportation Institute y se expresa como:

$$A_1 = \frac{10.409}{(K_4 d)^{0.06}} + 3.507 \quad (3.15)$$

o

$$A_2 = \left[ \frac{28.952}{(K_4 d)^{0.06}} - 7.817 \right] K_4 T X D^{0.14} \quad (3.16)$$

Donde:

$V$  = velocidad del vehículo, km/h

$TD$  = profundidad de labrado, mm

$TXD$  = profundidad de la textura del pavimento, mm

$d$  = profundidad o espesor de la película de agua, mm

$P$  = presión de la llanta,  $kP_a$

$k_1$  = coeficiente de conversión de unidades = 0.3048

$k_2$  = coeficiente de conversión de unidades = 6.894

$k_3$  = coeficiente de conversión de unidades = 0.794

$k_4$  = coeficiente de conversión de unidades = 25.4

$SD$  = deslizamiento, patinada (%). Se asume que se presenta hidropneación cuando hay un 10% del deslizamiento

Esta situación ocurre cuando la llanta se hace rodar 1.1 veces su circunferencia para alcanzar una distancia igual a una circunferencia.

Este método determina una película de profundidad  $d$ , asociada con los valores de  $V$ ,  $TD$ ,  $TXC$  y con  $SD = 10\%$ .

Así, por ejemplo, para unas condiciones medias de:

$V = 88 \text{ k/h}$

$TD = 5.55 \text{ mm}$  (labrado medio de la llanta)

$TXD = 0.97 \text{ mm}$  (textura media del pavimento)

$P = 186 \text{ kPA}$

$SD = 10\%$

$d = 1.87 \text{ mm}$

La manipulación de la ecuación para calcular la velocidad utilizando estos valores típicos muestra lo siguiente:

Un incremento del 1% en la textura del pavimento incrementa la profundidad de hidropneación en 1.6%.

Un incremento del 1% en la profundidad del labrado incrementa la profundidad de hidroplaneación en 0.8%.

Un incremento del 1% en la presión de las llantas incrementa la profundidad de hidroplaneación en 2.4%.

Adicionalmente, el estudio de esta ecuación indica que:

- ✓ 90 km/h es el valor de la velocidad para el control práctico de hidroplaneación.
- ✓ Una reducción de la velocidad en 1% incrementa la profundidad de hidroplaneación en un 25%.
- ✓ Velocidades por debajo de 90 km/h tienden a ser seguras contra el inicio de hidroplaneación, porque las lluvias más fuertes son insuficientes para generar dicha profundidad.
- ✓ Un incremento de la velocidad en 1% disminuye la profundidad de hidroplaneación en un 25%. Velocidades superiores a 90 km/h producen hidroplaneación con superficies de agua muy delgadas, que pueden corresponder a intensidades de 25 mm/h o menos, que son lluvias usualmente más pequeñas que las empleadas para el diseño de cunetas, entradas y alcantarillas.

Una vez se ha determinado  $d$ , se asume que éste es el espesor máximo de la película sobre el pavimento. El agua fluye como una lámina, transversalmente a la superficie hasta el borde de la cuneta. El ancho del flujo en lámina es igual al ancho  $W$  de la carpeta menos el ancho del escurrimiento longitudinal,  $T$ , o sea,  $(W-T)$ .

En el borde de la cuneta la profundidad de la lámina de agua  $d$  se obtiene de la ecuación que se analizó anteriormente, tomando por defecto un valor  $d = 1.867$  mm. Utilizando las ecuaciones de Manning y de continuidad, despejando  $i$  se obtiene la intensidad de la lluvia mm/h que causa hidroplaneación.

$$i = \left[ \frac{k_c}{Cn} \right] \left[ \frac{Sx}{(Sx^2 + S_0)^{0.25}} \right] \left[ \frac{d^{1.67}}{(W - T)} \right] \quad (3.17)$$

$i$  = intensidad lluvia, mm/h

$C$  = coeficiente de escorrentía adimensional

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning

$S_x$  = pendiente transversal, (m/m)

$S_o$  = pendiente longitudinal de la vía, (m/m)

$d$  = espesor de la película, (mm)

$k$  = constante igual 2289.4612

$W$  = ancho de la carpeta (m)

$T$  = ancho de la cuneta (m), sobre la que se desarrolla el flujo de escorrentía hacia los puntos de entrada.

La intensidad que se obtuvo con la ecuación anterior se puede utilizar en la ecuación racional y se determina  $Q$ .

Conociendo el tiempo de concentración,  $t_c$ , se puede determinar la frecuencia a la cual corresponde este evento, mediante la utilización de las curvas IDF.

### 3.3.1.3. **Método de la visión del conductor (9)**

El HEC-21 desarrolló otro método alternativo para seleccionar la intensidad de la lluvia, en el cual asume que los conductores no pueden ver y reducen la velocidad o se detienen, y esta condición gobierna el funcionamiento de la vía, más que la reacción del paso de la creciente por la cuneta. Este método tampoco depende de la frecuencia de la lluvia y se expresa de la siguiente manera:

$$S_v = \frac{K_c}{i^{0.68} V} \quad (3.18)$$

$S_v$  = visibilidad del conductor, m

$i$  = intensidad de la lluvia, mm/h

$V$  = velocidad del vehículo km/h

$K_c = 143\,587,88$

Esta relación empírica se desarrolló con base en los ensayos de la Texas A&M.

Con una velocidad de 90 km/h y una visibilidad del conductor de 150 m (valor más bajo del rango determinado por la AASHTO), de la ecuación 3.18 resulta una intensidad de lluvia de 125 mm/h. Si se tiene en cuenta que un vehículo genera salpicaduras que aumentan la densidad de las gotas de agua, una precipitación con una intensidad de 100 mm/h puede ser un valor límite que causa deterioro leve, porque las salpicaduras aumentan la densidad de las gotas de lluvia que percibe el ojo, es decir, que una intensidad de diseño,  $i$ , superior a 100 mm/h es probable que afecte la visión de los conductores y disminuya la distancia de visibilidad.

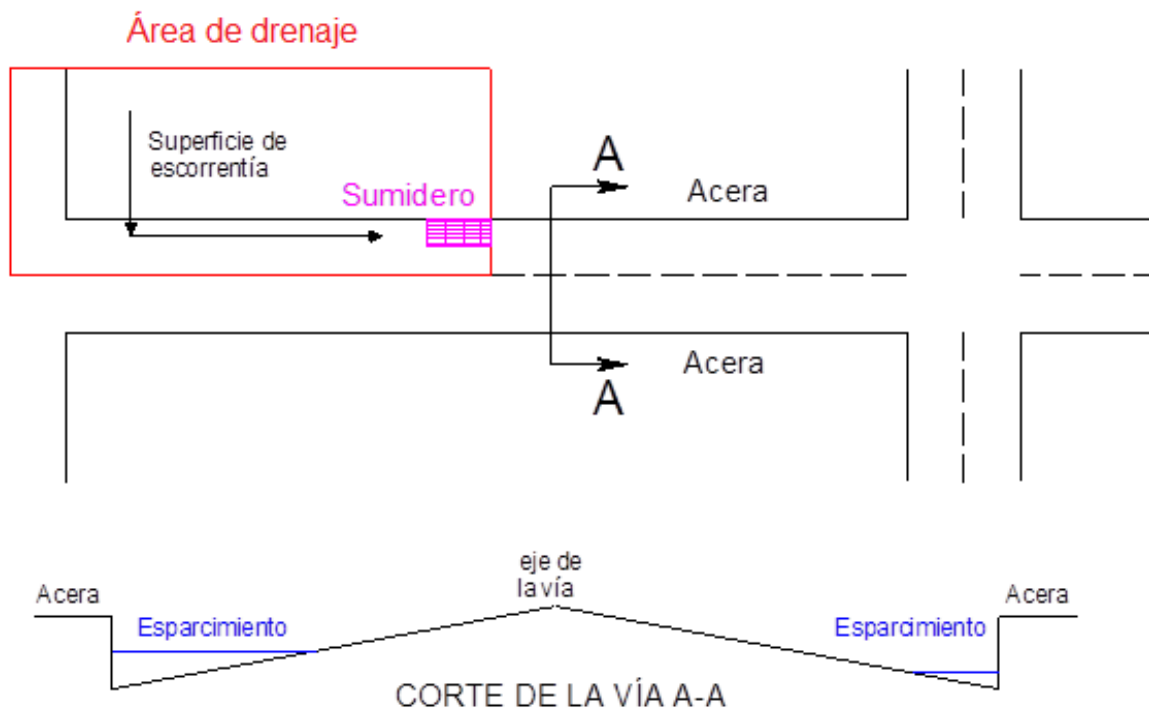
Por lo tanto, una intensidad de lluvia de 100 a 150 mm/h es un rango sugerido para evitar la pérdida de visibilidad de los conductores. El rango de intensidad se determina sin tener en cuenta la frecuencia de diseño, pero con el tiempo de concentración se obtiene una frecuencia. Intensidades de lluvia por debajo de este rango no deberían afectar la visibilidad a través del parabrisas. Sin embargo, la conducción nocturna bajo la lluvia es altamente dependiente de la visión. Se debe tener en cuenta que los datos que apoyan este rango de intensidades se obtuvieron a la luz del día.



## 4. CAPTACIONES DE DRENAJE URBANO CONVENCIONALES

### 4.1. Procedimiento para el Diseño de las Captaciones de Drenaje Urbano

El diseño de un sistema de drenaje en una calle es una tarea compleja, que se logra generalmente por un proceso iterativo de ensayo y error, que se inicia con la estimación de la capacidad de transporte de aguas lluvias en dicha vía, la cual provee una base para diseñar los sumideros a lo largo de la calle, como se muestra en la figura 4.1. La capacidad hidráulica de la calle está determinada por su clasificación y por los parámetros de corte transversal, como la pendiente transversal de la vía, la dureza de la superficie, la amplitud de la cuneta, etc.



**Figura 4.1 Sección transversal de la calle y área de drenaje**

Después de definir la capacidad hidráulica se establece la ubicación de los sumideros, de acuerdo con las recomendaciones que se presentan en este documento. Para diseñar un sistema de drenaje en la calle se establecen los siguientes pasos:

- a) Preparar un plano completo del proyecto en un plano topográfico. El diseño debe incluir calles de circulación de carros, lotes de parqueo, detención de estanques de almacenamiento, utilidades, entradas propuestas, uniones de locaciones, etc.
- b) Identificar la clasificación de las calles.
- c) Seleccionar la frecuencia de diseño del sistema de drenaje (tormenta).
- d) Determinar la capacidad conveniente de agua lluvia de la vía bajo el criterio del máximo esparcimiento de agua permitido, la profundidad del flujo de la cuneta  $Q_s$  y la seguridad sobre la vía.
- e) Ubicar y diseñar los sumideros a lo largo de la calle.

El diseño de los sumideros depende de su ubicación y se clasifican en sumideros en pendiente y sumideros en puntos bajos. Los primeros están diseñados para recolectar entre el 70 y el 85% del flujo de la cuneta. El agua lluvia restante se lleva a los sumideros aguas abajo.

En un sistema de entrada de calle el diseño de los sumideros individuales depende de las siguientes consideraciones:

- a) Predecir el caudal de diseño,  $Q_p$ , producido por el área de drenaje entre el sumidero aguas arriba y el sumidero bajo diseño.
- b) Verificar si el caudal de diseño,  $Q_p$ , viola alguna necesidad de diseño como el esparcimiento del agua, la profundidad en la cuneta, la velocidad máxima permitida de la corriente, es decir, la capacidad máxima de la vía.
- c) Clasificar el sumidero con un razonable factor de obstrucción.
- d) Calcular el flujo de arrastre (flujo no captado por el sumidero) para el sumidero aguas abajo.

La interdependencia entre los parámetros diseñados como la ubicación del sumidero, el área de drenaje, el caudal pico y la profundidad de la cuneta se ilustra en la figura 4.2.

## DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DEL DRENAJE URBANO

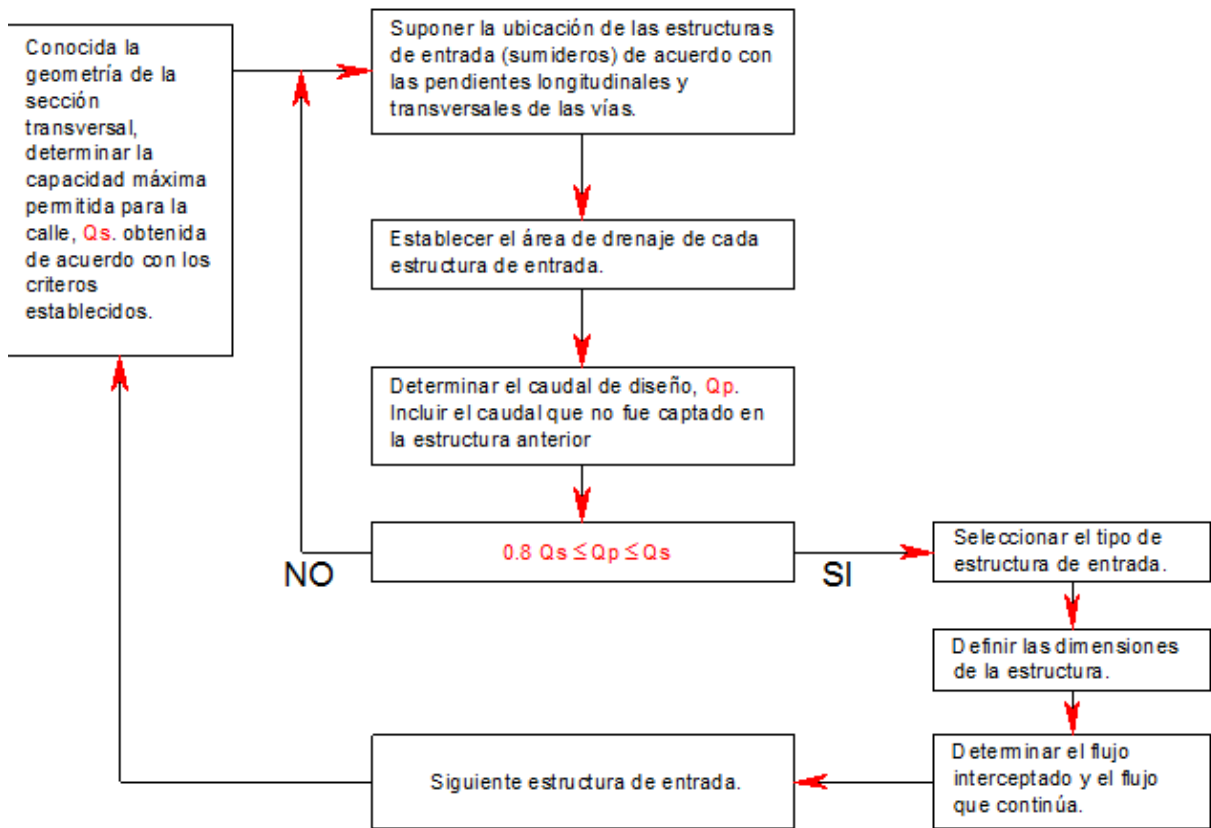


Figura 4.2 Diagrama de flujo para el diseño del drenaje urbano

### 4.2. Tipos de Cunetas

Las cunetas están adyacentes a la vía y transportan el agua lluvia, su función es llevarla hasta los sumideros. El ancho superior de una cuneta puede incluir una porción o todo un carril.

La sección de la cuneta se puede categorizar como convencional (tipo A) o con un perfil doble (tipo B), como se ilustra en las figuras 4.3 y 4.4. La cuneta convencional más representativa tiene una pendiente uniforme (figura A1) o compuesta, donde la pendiente varía de acuerdo con la pendiente transversal del pavimento (figura A2).

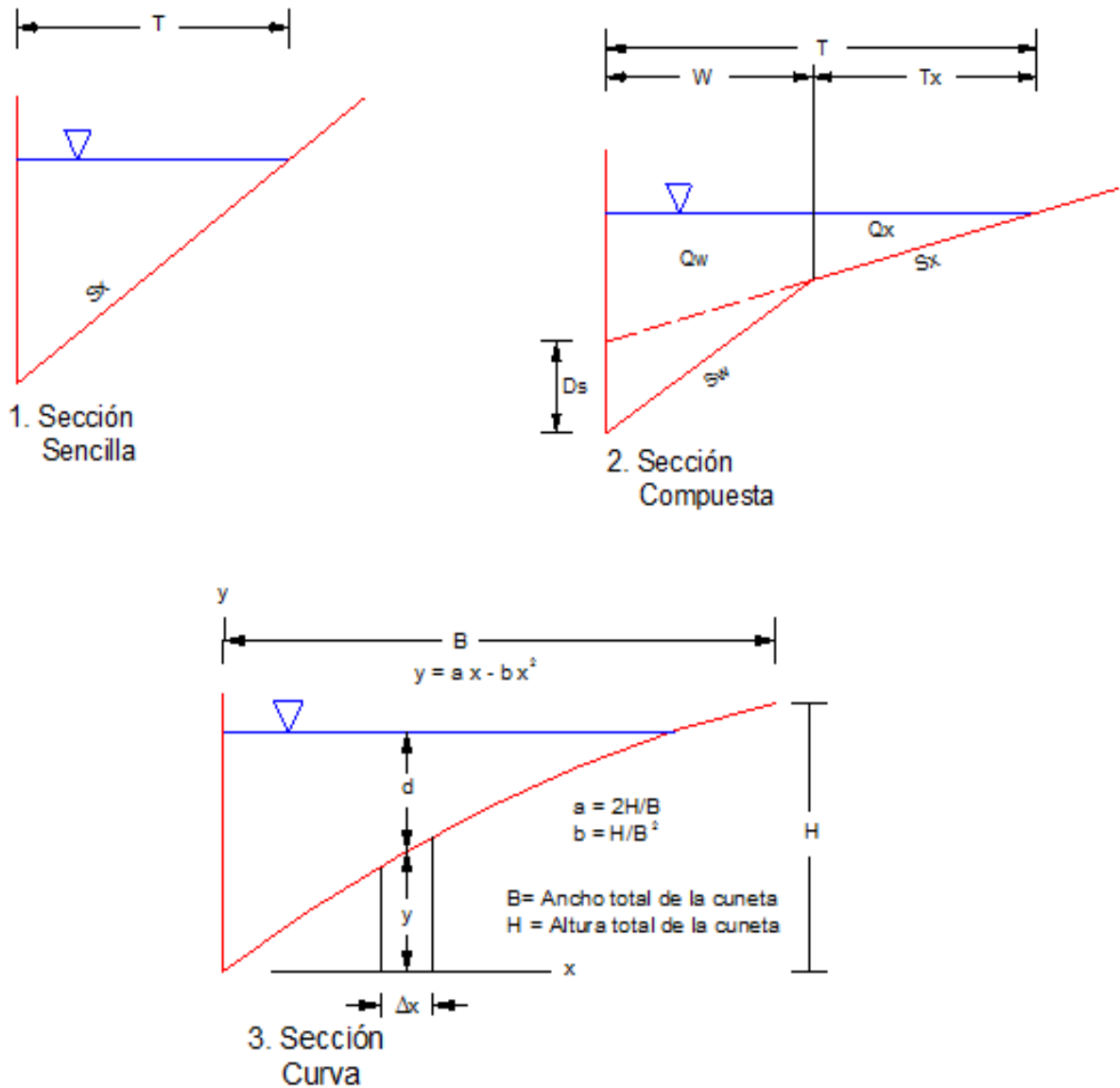
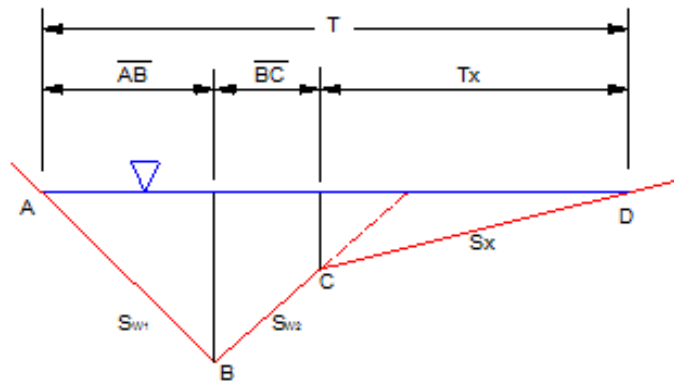
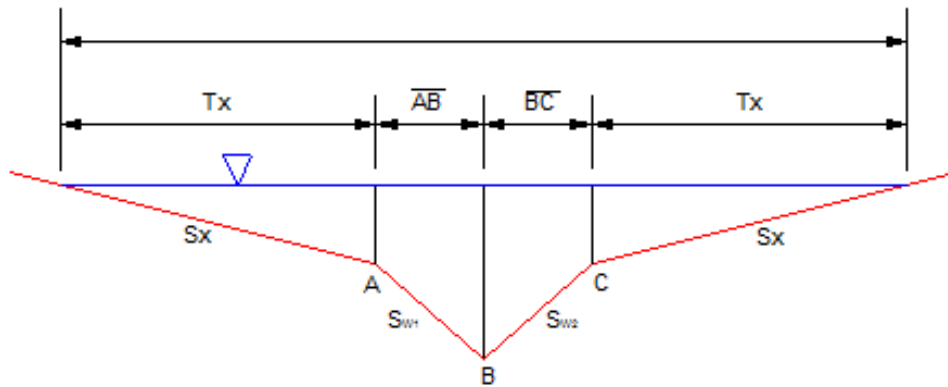


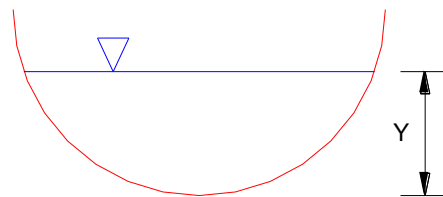
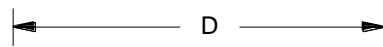
Figura 4.3 Secciones típicas de cuneta. Cunetas tipo A



1. Configuración cuneta en "V"



2. Configuración simétrica



3. Circular

Figura 4.4. Secciones típicas de cuneta. Cunetas tipo B

#### 4.2.1. Hidráulica del flujo en la cuneta (13)

En una vía, el flujo está compuesto por la precipitación que cae sobre ella y en sus zonas anexas. Los aportes se incrementan en la dirección del flujo hasta llegar al punto de entrada o sumidero. Con esta consideración, la característica hidráulica es estrictamente un flujo espacialmente variable (flujo no permanente); sin embargo, en el diseño se pueden suponer condiciones de flujo permanente y uniforme en la cuneta para simplificar el cálculo de los parámetros hidráulicos necesarios en el diseño de las entradas o sumideros correspondientes al esparcimiento máximo, al caudal máximo y a la profundidad sobre los sumideros.

De esta manera, las características hidráulicas sobre la vía dependen de la pendiente longitudinal, definida de acuerdo con los valores mínimos recomendados, de la pendiente transversal o bombeo, del caudal máximo correspondiente al tramo de la vía, del material del pavimento y de su geometría.

Cuando se conocen la geometría de la vía, el caudal de escorrentía, la pendiente longitudinal y la pendiente transversal es posible determinar la altura sobre la entrada o sumidero. En caso de que corresponda a una pendiente fuerte, es decir, mayor a la pendiente crítica, la altura de la lámina de agua sobre la entrada o sumidero podría asumirse como la altura normal,  $y_n$ . En este caso, el cálculo de las condiciones de flujo en la vía y a la entrada de la estructura de captación se debe realizar utilizando la ecuación de flujo uniforme de Manning. Para una sección triangular sencilla, como es el caso más común de una vía, la ecuación está en función de la lámina de agua,  $y$ , y de la geometría de la cuneta; por tanto,

$$Q_s = \frac{0.375}{n} (y)^{8/3} \frac{S_o^{1/2}}{S_x} \quad (4.1)$$

Donde:

$Q_s$  = caudal de escorrentía sobre la cuneta,  $m^3/s$

$n$  = coeficiente de Manning con valores característicos

$S_x$  = pendiente transversal,  $m/m$

$y$  = profundidad de la lámina de agua,  $m$

$S_0$  = pendiente longitudinal de la vía, m/m

La misma expresión, en términos de la geometría de la cuneta y del ancho del esparcimiento sobre su superficie, es

$$Q_s = \frac{0.375}{n} S_x^{1.67} T^{2.67} S_0^{0.5} \quad (4.1a)$$

Donde:

$Q_s$  = caudal de escorrentía, m<sup>3</sup>/s

$n$  = coeficiente de Manning con valores característicos

$S_x$  = pendiente transversal, m/m

$T$  = ancho del esparcimiento, m

$S_0$  = pendiente longitudinal de la vía, m/m

En caso contrario, cuando la pendiente de la vía es menor que la pendiente crítica, se considera un flujo subcrítico y la altura sobre el sumidero corresponde a la altura crítica  $y_c$ . Para este caso, el cálculo del flujo sobre la cuneta se realiza a partir de la definición del flujo crítico. La ecuación está en función de la geometría de la cuneta y la profundidad de la lámina de agua resultante:

$$Q = \frac{2}{5} \frac{\sqrt{g}}{S_x} (y_c)^{5/2} \quad (4.2)$$

Donde:

$g$  = aceleración de la gravedad m/s<sup>2</sup>

$S_x$  = pendiente transversal, m/m

$y_c$  = profundidad de la lámina de agua, m

La misma expresión, en términos de la geometría de la cuenta y del ancho de esparcimiento sobre la superficie, es:

$$Q = \frac{2}{5} \sqrt{g} (S_x)^{3/2} T^{5/2} \quad (4.2a)$$

Donde:

$g$  = aceleración de la gravedad  $m/s^2$

$S_x$  = pendiente transversal, m/m

$T$  = ancho del esparcimiento, m

En la siguiente sección se presentan las demostraciones de las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la capacidad de la vía para cada uno de los dos tipos de flujo que se pueden presentar.

En la mayor parte de las referencias se presenta únicamente el cálculo de la capacidad de la vía, suponiendo que el flujo siempre es supercrítico y, por tanto, la altura de la lámina de agua junto a la estructura de entrada es la profundidad normal  $y_n$ . De acuerdo con esta hipótesis, el cálculo de la capacidad máxima de la vía se realiza utilizando la ecuación de flujo uniforme, y para este caudal aguas arriba en la cuneta existirá una altura crítica superior a la profundidad normal, que no debe sobrepasar la altura del sardinel. Sin embargo, si se suponen condiciones de flujo uniforme, la altura crítica se presentará sólo en un punto aguas arriba de la cuneta y rápidamente se llega a la condición de flujo uniforme con la profundidad normal; además, si se considera que el flujo es espacialmente variado y que el caudal será máximo en la estructura de entrada, no es necesario verificar que la altura de la lámina de agua para condiciones de flujo crítico sea menor que la altura del sardinel (figura 4.5).

Cuando las pendientes longitudinales de la vía son muy suaves y el flujo es subcrítico su capacidad es notoriamente menor, ya que junto a la estructura de entrada se tendría la profundidad  $y_c$ . El cálculo de la capacidad máxima de la vía se realiza utilizando la ecuación de flujo crítico, y para este caudal aguas arriba en la cuneta existirá una altura normal mayor a la profundidad crítica, que no debe sobrepasar la altura del sardinel. Sin embargo, cuando se calcula la capacidad máxima de la calle, es decir, cuando la altura de la lámina de agua es igual a la altura de sardinel, no es posible calcular la capacidad máxima de la vía para condiciones de flujo crítico, porque esto significaría que aguas arriba en la cuneta se tendrá una profundidad normal mayor a la profundidad del sardinel desbordando la cuneta. Cuando la profundidad normal aguas arriba de la cuneta es mayor



que la altura del sardinel se requiere calcular la capacidad máxima de la vía para una profundidad de la lámina de agua en condiciones de flujo uniforme (figura 4.6).

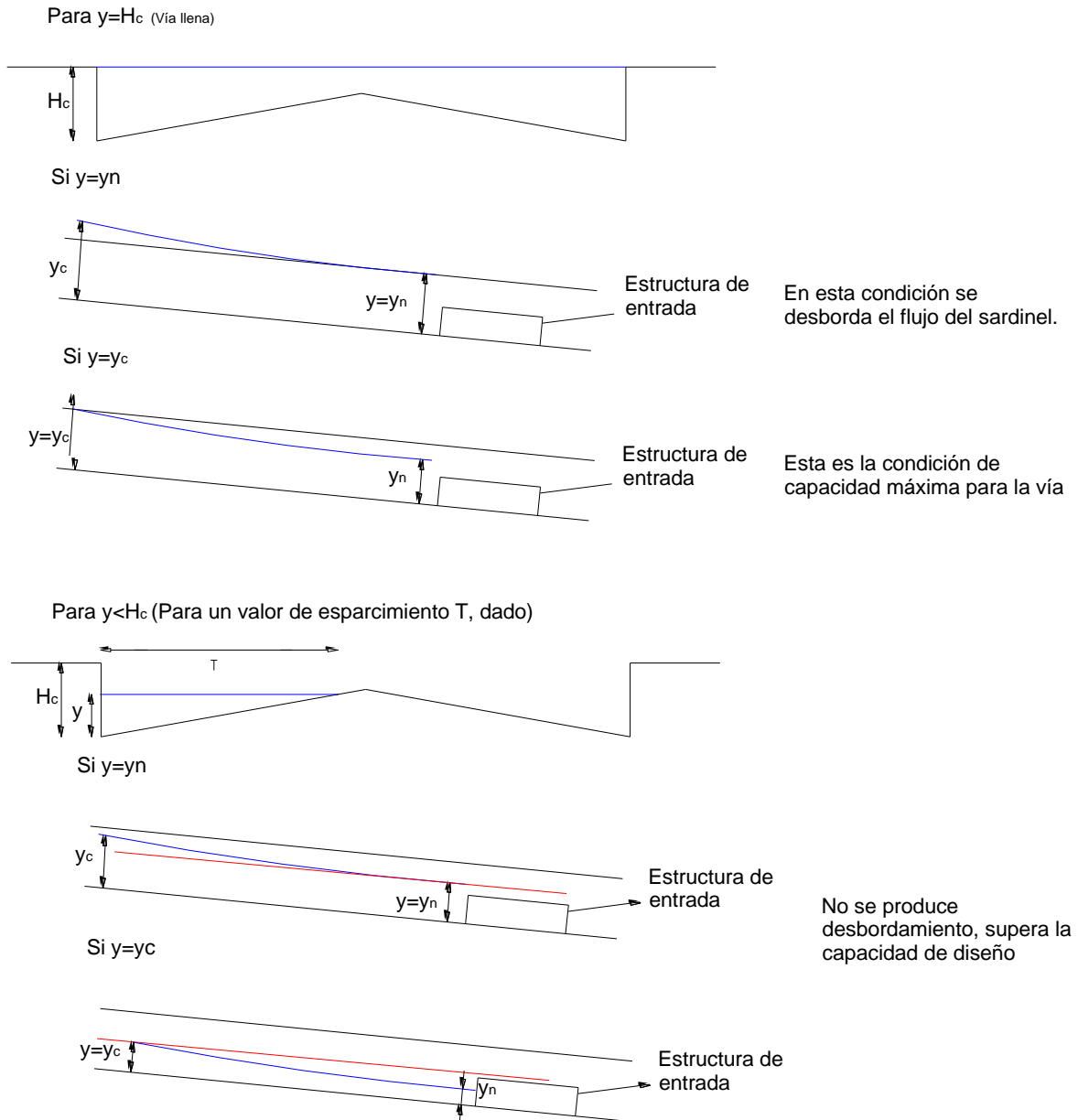
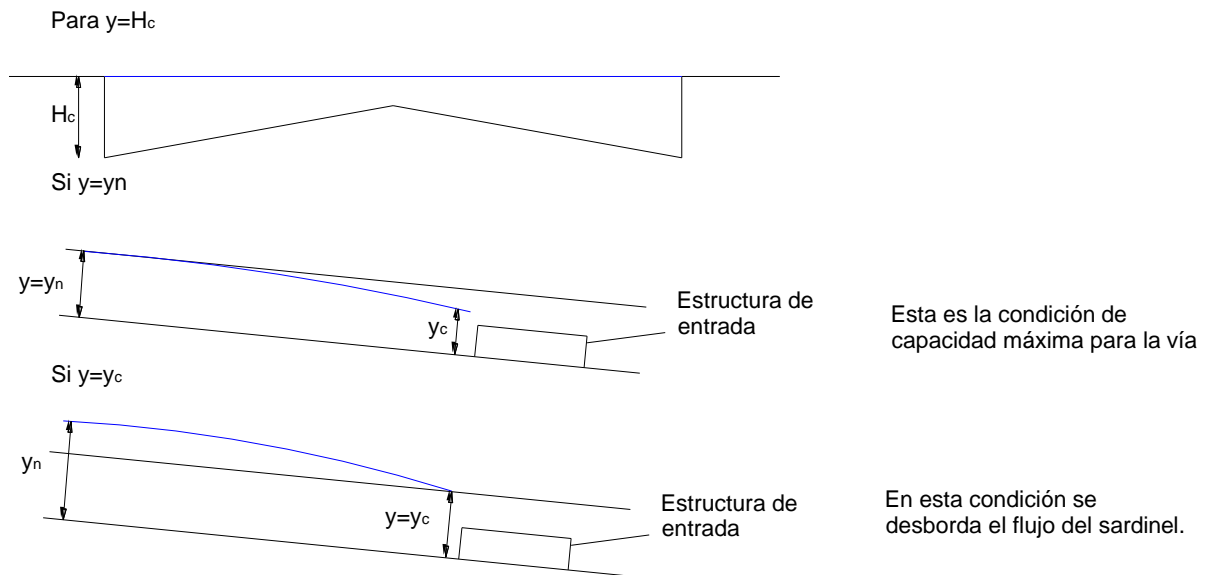


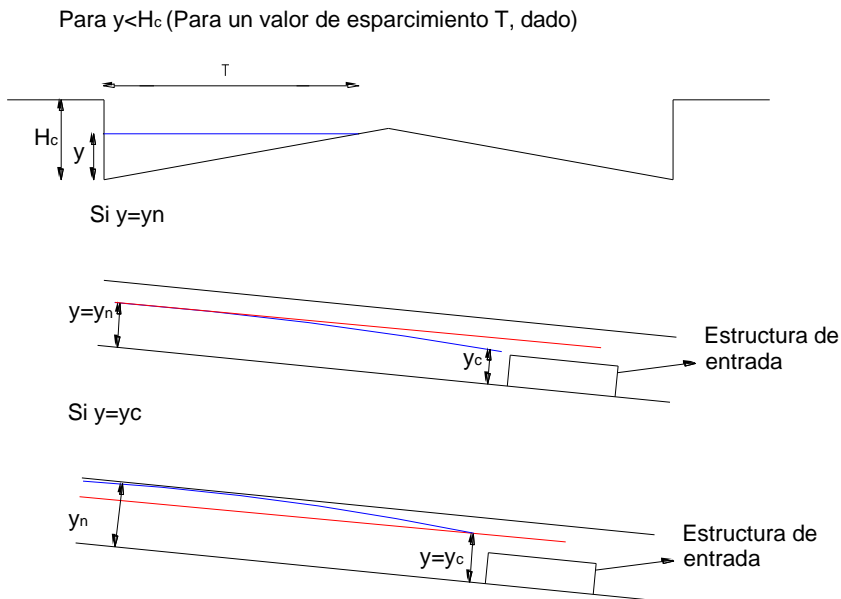
Figura 4.5 Perfiles sobre la cuneta para un flujo supercrítico

En la práctica, la capacidad de la vía se calcula únicamente en condiciones de flujo uniforme. De acuerdo con estas consideraciones, para flujos subcrítico y supercrítico la condición de flujo uniforme para el cálculo de la capacidad máxima puede ser correcta.

En el caso de un flujo supercrítico, para calcular su capacidad con la condición de flujo uniforme debe verificarse que la lámina de agua aguas arriba correspondiente a la profundidad crítica no sobrepase la altura del sardinel. Sin embargo, de acuerdo con lo expuesto, esto no es necesario. Para un flujo subcrítico, aunque la condición para calcular el caudal máximo sobre la calle es suponer la altura de la lámina de agua igual a la profundidad crítica, la posibilidad de desbordamiento de la cuneta es mayor, por lo que se sugiere calcular la capacidad máxima para una lámina de agua igual a la profundidad normal. De todas formas, la altura frente a la estructura de entrada para un flujo supercrítico es la profundidad  $y_n$  y para un flujo subcrítico es la profundidad crítica  $y_c$ .



**Figura 4.6 Perfiles sobre la cuneta para un flujo subcrítico. Para  $y=H_c$**



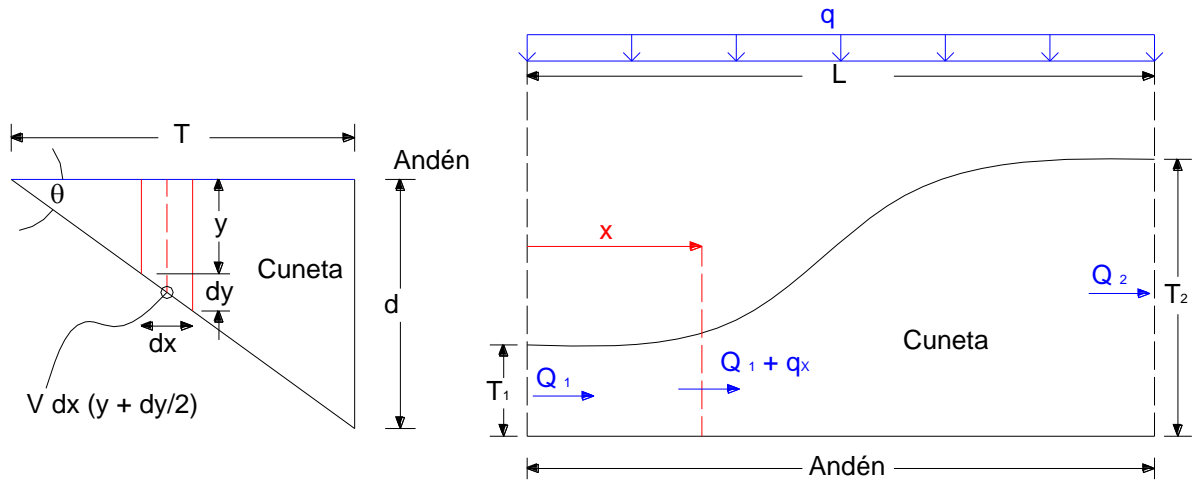
**Figura 4.6a Perfiles sobre la cuneta para un flujo subcrítico. Para  $y < H_c$**

#### 4.2.2. Demostración de las ecuaciones utilizadas para el cálculo del caudal transportado por una cuneta en una vía (adaptación realizada de la referencia (23))

Teniendo en cuenta un flujo espacialmente variado que se desarrolla en una cuneta (figura 4.7) se realizan las siguientes simplificaciones para establecer las condiciones de flujo uniforme en el procedimiento de cálculo.

Con referencia a la sección transversal de la figura 4.7, el flujo en una fracción de cuneta es  $dQ$  para un ancho  $dx$ , y se expresa de la siguiente manera:

$$dQ = V dx \left( y + \frac{dy}{2} \right) \quad (4.3)$$



(a) Flujo en una Cuneta triangular

(b) Flujo espacialmente variado en una cuneta

**Figura 4.7 Flujo en una cuneta triangular. Sección transversal. (23)**

Donde:

$V$  = velocidad de flujo del área en consideración

$y$  = profundidad de flujo en la cuneta para la sección de área tomada

#### 4.2.2.1. *Para un flujo normal*

Utilizando la ecuación de Manning se puede definir el radio hidráulico y el área para la sección de la cuneta, así:

$$V = \frac{C_0}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4.4)$$

Donde:

$V$  = velocidad media de flujo en la cuneta

$C_0$  = coeficiente de unidades, 1 para el sistema internacional

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning

$S$  = pendiente longitudinal de la cuneta (pendiente de la vía)

$R$  = radio hidráulico de la sección de área elemental considerada para el análisis

$$R = \frac{A}{P} \quad (4.5)$$

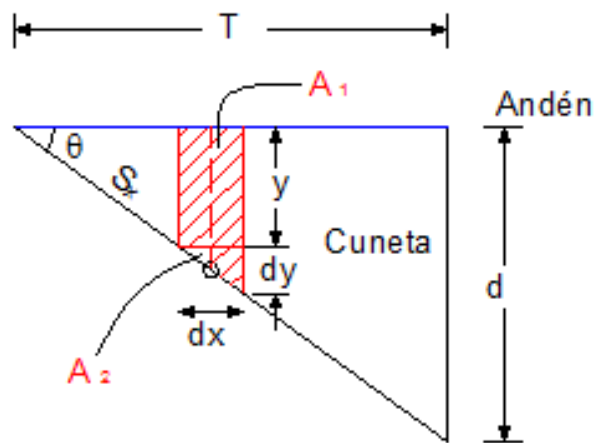
$$A = A_1 + A_2 \quad (4.6)$$

$$A = y dx + \frac{1}{2} dy dx \quad (4.7)$$

$$P = l = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (4.8)$$

Remplazando las expresiones anteriores para el área y el perímetro en la ecuación 4.4, se obtiene lo siguiente:

$$V = \frac{C_0}{n} \left( \frac{y dx + \frac{1}{2} dy dx}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \right)^{2/3} S^{1/2} \quad (4.9)$$



**Figura 4.8 Elemento diferencial de área en la cuneta para definir propiedades geométricas. (23)**

La pendiente de la cuneta (bombeo) es  $S_x = \frac{dy}{dx} = \frac{d}{T}$ ; además, se tiene que  $\sqrt{dx^2 + dy^2}$ , y reemplazando la primera expresión en la segunda se obtiene:

$$\sqrt{dx^2 \left( \frac{dx^2}{dx^2} + \frac{dy^2}{dx^2} \right)} \Rightarrow dx \sqrt{1 + S_x^2} \quad (4.10)$$

Reemplazando en la ecuación 4.9:

$$V = \frac{C_0}{n} \left( \frac{y dx + \frac{1}{2} dy dx}{dx \sqrt{1 + S_x^2}} \right)^{2/3} S^{1/2} \quad (4.11)$$

Luego, para valores pequeños de  $S_x$  se puede decir que  $S_x \approx 0$ , y se obtiene:

$$V = \frac{C_0}{n} \left( y + \frac{1}{2} dy \right)^{2/3} S^{1/2} \quad (4.12)$$

Sustituyendo la ecuación 4.12 en la 4.3, y asumiendo que el diferencial  $dy/2$  es aproximadamente cero, se tiene que:

$$dQ = \frac{C_0}{n} (y)^{5/3} dy \frac{S^{1/2}}{S_x} \quad (4.13)$$

Integrando la ecuación anterior entre 0 y d, puesto que la profundidad varía desde cero hasta el valor máximo en el sardinel, se tiene que:

$$Q = \int_0^d \frac{C_0}{n} (y)^{5/3} dy \frac{S^{1/2}}{S_x}$$

$$Q = \frac{3 C_0}{8 n} (d)^{8/3} \frac{S^{1/2}}{S_x} \quad (4.14)$$

La ecuación anterior representa el flujo en la cuneta cuando se encuentra completamente llena, hasta el borde del andén.

Para obtener una ecuación más general se procede a definir el esparcimiento en la vía dado por T. Según la figura 4.8 se tiene que:

$$\begin{aligned} \tan\theta &= \frac{d}{T} \Rightarrow T = \frac{d}{\tan\theta} \\ \tan\theta &= \frac{dy}{dx} = S_x \\ T &= \frac{d}{S_x} \Rightarrow d = S_x T \end{aligned} \quad (4.15)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en 4.14, se obtiene la ecuación para el flujo en una cuneta:

$$Q = \frac{3 C_0}{8 n} S^{1/2} S_x^{5/3} (T)^{8/3} \quad (4.16)$$

O, también, para el sistema internacional de unidades  $C_0 = 1$ :

$$Q = \frac{0.375}{n} S^{1/2} S_x^{5/3} (T)^{8/3} \quad (4.17)$$

#### 4.2.2.2. **Para un flujo crítico**

Utilizando el concepto de flujo crítico en canales abiertos se puede definir la velocidad del flujo sobre la cuneta como:

$$V = \sqrt{gD} \quad (4.18)$$

Donde:

$g$ = aceleración de la gravedad

$D$ = profundidad hidráulica

$$D = \frac{A}{T} \quad (4.19)$$

Como se definió en la demostración anterior, de acuerdo con la figura 4.7, se tiene:

$$A = A_1 + A_2$$

$$A = yd_x + \frac{1}{2}d_y d_x$$

$$T = dx$$

Remplazando las ecuaciones anteriores en la ecuación 4.18:

$$D = \frac{yd_x + \frac{1}{2}d_y d_x}{dx} = y + \frac{1}{2}d_y \quad (4.20)$$

$$V = \sqrt{g \left( y + \frac{1}{2}d_y \right)} \quad (4.21)$$

Sustituyendo la ecuación 4.21 con la ecuación 4.3, resulta:

$$dQ = \sqrt{g \left( y + \frac{1}{2}d_y \right)} dx \left( y + \frac{1}{2}d_y \right)$$
$$dQ = \sqrt{g} dx \left( y + \frac{1}{2}d_y \right)^{3/2}$$

Asumiendo que el diferencial  $\frac{1}{2}d_y$  es aproximadamente cero,

$$dQ = \sqrt{g} dx (y)^{3/2} \quad (4.22)$$

Multiplicando y dividiendo por  $dy$  se obtiene:

$$dQ = \sqrt{g} dx (y)^{3/2} \frac{dy}{dy}$$



$$dQ = \sqrt{g} (y)^{3/2} \frac{dy}{S_x} \rightarrow dQ = \frac{\sqrt{g}}{S_x} (y)^{3/2} dy \quad (4.23)$$

Integrando la ecuación anterior entre 0 y  $d$  se obtiene el caudal total sobre la cuneta con las características geométricas correspondientes, así:

$$Q = \int_0^d \frac{\sqrt{g}}{S_x} (y)^{3/2} dy$$

$$Q = \frac{2\sqrt{g}}{5 S_x} (d)^{5/2} \quad (4.24)$$

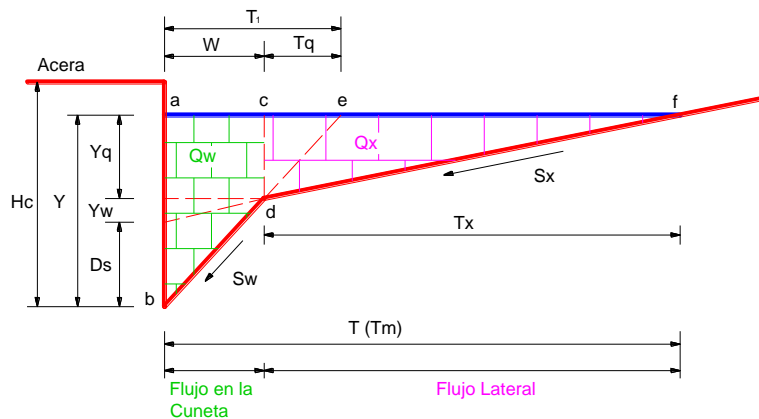
Sustituyendo del término  $d$  de la ecuación 4.15, en la ecuación 4.24 el caudal para un flujo crítico en una cuneta llena es:

$$Q = \frac{2}{5} \sqrt{g} (S_x)^{3/2} T^{5/2} \quad (4.25)$$

#### 4.2.3. Cuneta con sección transversal compuesta (13)

Para calcular el flujo en una cuneta con sección transversal compuesta se utilizan las mismas fórmulas que para calcular la capacidad de una sección triangular sencilla, con las siguientes modificaciones: cuando la sección es compuesta, normalmente el esparcimiento de aguas lluvias en la vía se divide entre el flujo en la cuneta propiamente dicha y el flujo lateral. El flujo en la cuneta se denomina flujo frontal,  $Q_w$ , que se transporta dentro del ancho de la cuneta y el flujo que se transporta por la vía se llama flujo lateral,  $Q_x$ .

El escurrimiento en la vía está determinado por la división de la sección transversal de flujo en tres porciones de áreas: **abdec**, **cde** y **cdf** (figura 4.9). Asumiendo que la fricción lateral interna del flujo contra el cordón de andén se desprecia, se puede aplicar separadamente la ecuación 4.1.a para cada porción con su pendiente transversal, quedando entonces la estimación del escurrimiento total así:



**Figura 4.9 Parámetros hidráulicos de una vía. (23)**

$$Q_s = Q_x + Q_w = Q_x + Q_1 - q_1 \quad (4.26)$$

$$A_s = 0.5W(Y + Y_q) + 0.5Y_q T_x \quad (4.27)$$

$$T = W + T_x \quad (4.28)$$

$$V_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad (4.29)$$

Donde:

$Q_s$  = escurrimiento en la calle

$Q_w$  = flujo frontal transportado por el ancho de la cuneta  $W$ , donde la capacidad de flujo es la diferencia entre el área **abdec** llevando el caudal  $Q_1$  y el área **cde** llevando el caudal  $q_1$

$Q_x$  = flujo lateral transportado por el ancho de la vía

$Y$  = profundidad del flujo en la cuneta

$D_s$  = profundidad de la depresión de la cuneta

$Y_q$  = profundidad del flujo lateral al borde de la vía

$T_x$  = ancho del esparcimiento del flujo lateral

$T$  = ancho del esparcimiento en la vía

$V_s$  = velocidad promedio del flujo en la sección transversal

Una sección transversal compuesta está constituida por la pendiente transversal de la vía,  $S_x$ , y la pendiente de la cuneta,  $S_w$ , que se define así:

$$S_w = S_x + \frac{D_s}{W} \quad (4.30)$$

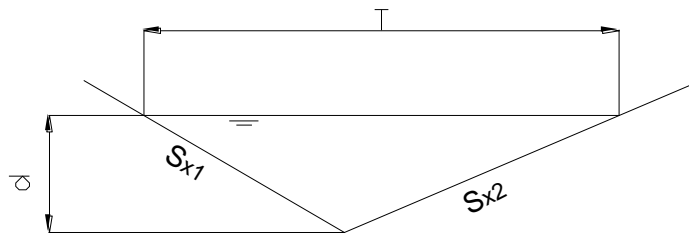
Donde:

$S_w$  = pendiente transversal en la cuneta de la vía, m/m

$W$  = ancho de la cuneta deprimida, m (usualmente 0.60 m)

$D_s$  = profundidad de la depresión, m (usualmente 0.05 m)

#### 4.2.4. Cuneta con sección transversal en forma de V (14)



**Figura 4.10 Cuneta de sección transversal en forma de V. (14)**

Las ecuaciones que se utilizan para una cuneta triangular sencilla se pueden emplear también para calcular el flujo en una sección transversal en forma de V (figura 4.10), con una pendiente ajustada, así:

$$S_x = \frac{S_{x1}S_{x2}}{S_{x1}+S_{x2}} \quad (4.31)$$

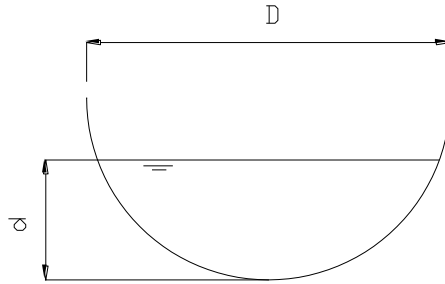
Donde:

$S_x$  = pendiente transversal ajustada

$S_{x1}$  = pendiente transversal derecha

$S_{x2}$  = pendiente transversal izquierda

#### 4.2.5. Cuneta con sección transversal circular (24)



**Figura 4.11 Cuneta con sección transversal circular. (14)**

Para calcular el caudal sobre una sección circular (figura 4.11) se parte de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{D^{8/3} S_o^{1/2}}{n} \left( \frac{d}{DK_c} \right)^{1/0,488} \quad (4.32)$$

Donde:

$K_c$  = constante empírica igual a 1,179 (0,972 en sistema inglés)

$D$  = diámetro de la sección circular de la cuenta en metros [m]

$d$  = altura de la lámina de agua en la cuenta [m], que puede calcularse como,

$$d = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{T}{2}\right)^2} \quad (4.33)$$

Donde:

$T$  = es el ancho de esparcimiento en la cuenta [m]

En la tabla 4.1 se presentan los valores recomendados para la  $n$  de Manning, de acuerdo con el tipo de material y el acabado superficial de la cuneta o el pavimento.

**Tabla 4.1 Coeficiente de rugosidad de Manning para pavimentos y cunetas (8) (25)**

Tipo de cuneta o pavimento	Coeficiente de Manning, n
Cuneta en concreto liso	0.012
Pavimento asfáltico	
Textura suave	0.013
Textura áspera	0.016
Cuneta en asfalto	
Suave	0.013
Áspero	0.015
Pavimento rígido	
Terminado con llana	0.014
Terminado con escoba	0.016
Revestimiento con adoquines	0.02
Cunetas con pequeñas pendientes longitudinales hasta del 2% están sujetas a la acumulación de sedimentos, para estos casos los valores de n indicados anteriormente se deben incrementar entre 0,002 y 0,005	n

#### 4.2.6. Cálculo de la capacidad de la calle (26)

El parámetro clave para determinar la capacidad de la calle es el esparcimiento máximo. El ancho de esparcimiento permitido para el diseño de la vía, de acuerdo con los análisis realizados, puede adoptarse como el menor entre el máximo permitido por la normatividad o las referencias y el ancho de esparcimiento correspondiente al flujo sobre la vía, si la lámina de agua fuera la altura total del sardinel. Para determina la capacidad de la vía el ancho de esparcimiento se selecciona como:

$$T = \min\left(T_m, \frac{H_c - D_s}{S_x}\right) \quad (4.34)$$

Donde:

$T$  = ancho de esparcimiento permitido

$T_m$  = ancho de esparcimiento máximo por normatividad o referencias

$H_c$  = altura del sardinel

$D_s$  = depresión en la cuneta

$S_x$  = pendiente de la vía

En el enfoque anterior se toman en cuenta las características de la cuneta y la geometría de calle, pero no la velocidad de flujo ni la fuerza de impulso. Como resultado, en la práctica, es necesario que el ingeniero examine la condición de flujo con las preocupaciones de seguridad. Por ejemplo, una calle empinada puede tener más capacidad, pero la alta velocidad de flujo tiene que estar sujeta a una reducción, para favorecer la seguridad de los vehículos y los peatones. Entre las diversas recomendaciones en materia de seguridad de flujo de la calle, los criterios comúnmente adoptados son: el producto permisible VD (Velocidad\*Lámina de agua) y el factor de reducción de la capacidad de la calle.

#### 4.2.6.1. **Producto VD permitido (26)**

(Velocidad (V) y Profundidad del agua (D) del flujo en la cuneta)

Muchos accidentes de tráfico causados por hidropneación ocurren por inundaciones indeseables de la vía. La ecuación empírica para la velocidad de hidropneación la formularon Agrawal et al. en 1977, adoptando como condición que el coeficiente de fuerza de frenado se reduce a cero para analizar el inicio del fenómeno de hidropneación. Gallway et al. (1979) analizaron la velocidad de hidropneación del vehículo por el parámetro denominado "Spindown" o *patinado*, que tiene en cuenta el cambio de velocidad de rotación de la llanta debido a la pérdida de contacto con la superficie del pavimento durante la condición de hidropneación. Huebner et al. (1986) presentaron una ecuación empírica entre la velocidad de hidropneación y el espesor de la película de agua. Dicha ecuación expone una relación hiperbólica entre la velocidad del vehículo y la

altura de la lámina de agua. El flujo de agua en una calle impone una fuerza sobre el vehículo y los peatones.

Entre todos los parámetros de la sección transversal de la vía, el más sensible es la depresión de la cuneta. Durante un evento de tormenta mayor con el ancho de esparcimiento máximo, el efecto de la depresión disminuye.

En la práctica, la capacidad hidráulica de la calle está sujeta a una reducción cuando la seguridad se convierte en una preocupación. Para reducir el riesgo de flujos de inundación con altas velocidades, la reducción de la capacidad hidráulica de la calle debe ser proporcional a la fuerza de impulso asociado con el flujo de la cuneta. Con un concepto similar al análisis hidroplaneación, la relación hiperbólica entre la velocidad y la profundidad del agua del flujo en la cuneta se ha adoptado como un control de la capacidad de esparcimiento máximo en la calle. La profundidad de flujo en la cuneta incluye la depresión. Por simplicidad, vamos a suponer que la depresión es cero. El producto VD se puede derivar de la ecuación 4.1 como:

$$Q_s = \frac{k}{n} S_x^{1.67} T^{2.67}$$

Su relación de la velocidad con el caudal es:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Y el área de la sección transversal de una cuneta triangular sin depresión es:

$$A = \frac{1}{2}TD$$

$$D = S_x T$$

Entonces, el producto VD permisible es:

$$VD = \frac{2K}{n} (TS_x)^{1.67} \sqrt{S_o} \quad (4.35)$$

Comparando la ecuación para flujo uniforme en la cuneta con la ecuación anterior se obtiene:

$$Q = \frac{1}{2}(VD)T \quad (4.36)$$

Esta ecuación describe la relación entre la capacidad hidráulica de la vía y el producto VD. El Hydrologic Criteria and Drainage Design Manual (1999), que se utiliza en Las Vegas (Nevada), sugiere que el producto VD del flujo de la cuneta en la calle sea menor a seis para el evento de tormenta menor y de ocho para uno de tormenta mayor.

De acuerdo con la ecuación 4.36, la capacidad de la calle por unidad de ancho es:

$$q = \frac{Q}{T} = \frac{VD}{2} \quad (4.37)$$

La fuerza de impulso del flujo de la cuneta consiste en dos componentes: estático y dinámico. En comparación, la fuerza estática de un flujo en la cuneta es despreciable debido a la poca profundidad. Con la ayuda de las ecuaciones 4.1a y 4.37 la fuerza dinámica, M, de un flujo de canal es:

$$M = \rho QV = \frac{\rho}{2S_x}(VD)^2 \quad (4.38)$$

Donde:

M= fuerza dinámica o cantidad de movimiento

$\rho$ = densidad del agua

Las restricciones de diseño como la altura de la lámina de agua en la cuneta y el ancho de esparcimiento no reflejan el impacto de la velocidad del flujo de agua. Las ecuaciones 4.37 y 4.38 indican que la capacidad de la calle y la fuerza dinámica son proporcionales al producto VD. Una reducción en este producto puede imponer directamente una limitación en la capacidad de la vía por unidad de ancho y en la fuerza de impulso del agua sobre la cuneta, considerando que el producto VD de flujo en la cuneta no debe exceder un límite L, definido por seguridad.



$$VD \leq L \quad (4.39)$$

En el cual L= producto permisible VD.

Sustituyendo la ecuación 4.35 en la ecuación 4.39 y despejando el esparcimiento sobre la vía, tenemos:

$$T_L \leq \frac{1}{S_x} \left( \frac{nL}{2K\sqrt{S_0}} \right)^{0.6} \quad (4.40)$$

De las ecuaciones 4.36 y 4.39 la capacidad de la calle  $Q_L$  es igual a:

$$Q_L = \frac{1}{2} L T_L \quad (4.41)$$

Donde:

$Q_L$ = capacidad hidráulica de la calle por el producto VD

Tomando en cuenta la limitación del producto VD, la ecuación 4.34 se considera nuevamente como:

$$T = \min\left(T_m, \frac{D_m}{S_x}, T_L\right) \quad (4.42)$$

La ecuación 4.42 ayuda al ingeniero en la selección del esparcimiento de agua para el diseño, considerando la profundidad de agua en la cuneta, el ancho de vía y la seguridad.

#### 4.2.6.2. **Método de la reducción de la capacidad de la vía (26)**

Además del enfoque de producto VD permisible, para diseños de drenaje en la vía también se recomienda el método de reducción de capacidad. Por ejemplo, la ciudad de Denver convierte los productos VD limitantes en un conjunto de factores de reducción. La

capacidad admisible de la vía es igual a la capacidad de la cuneta, multiplicado por un factor de reducción que se define como:

$$R = \frac{Q_L}{Q_{llena}} \quad (4.43)$$

Donde:

$Q_L$  = capacidad admisible de la vía

$Q_{llena}$  = capacidad completa de la vía

R = factor de reducción

Como se mencionó, cuando el ancho de esparcimiento es muy amplio la condición de flujo en una calle se puede representar por una sección recta. Sustituyendo las ecuaciones 4.40 y 4.36 en 4.43 se obtiene:

$$R = \frac{\frac{1}{2}LT_L}{V\left(\frac{1}{2}H_cT\right)} = \frac{1}{(TS_x)^{2.67}} \left(\frac{nL}{2K\sqrt{S_o}}\right)^{1.6} \quad (4.44)$$

$$0 \leq R \leq 1.0$$

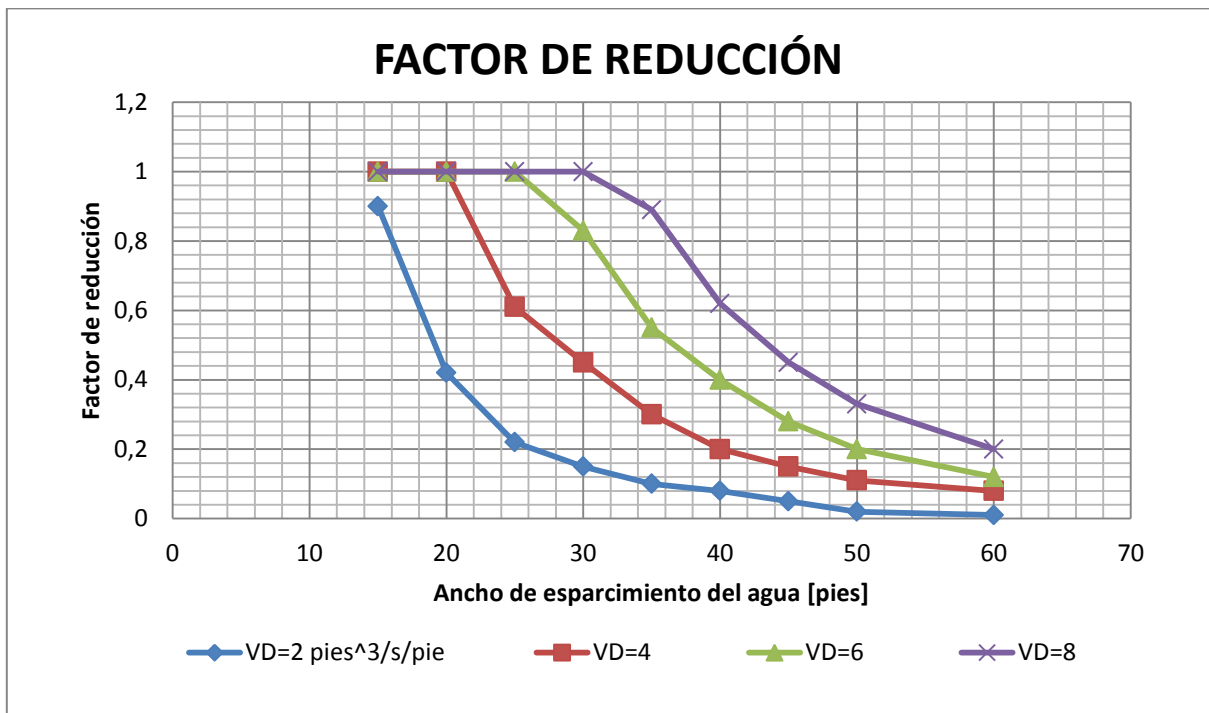
La ecuación 4.44 tiene tres variables: R, T y L. Con una pendiente longitudinal  $S_o$  específica como 0,01, la figura 4.12 presenta la relación entre las otras variables. De la misma manera, podemos producir muchas gráficas similares por cada  $S_o$ .

Para los diseños de drenaje de aguas lluvias se aplican enfoques basados en el riesgo. Un nivel de riesgo seleccionado generalmente se aplica a toda una zona o región. Cualquier parámetro incompatible agrega incertidumbres aleatorias para el nivel de riesgo seleccionado. Con el fin de evitar variaciones aleatorias en el método de reducción de la capacidad, la ecuación 4.44 requiere preseleccionar un esparcimiento máximo de agua regional y limitar el producto VD para generar un conjunto de factores de reducción. De acuerdo con esto, la ecuación 4.44 se reescribe como:

$$R = \frac{1}{(T_R S_X)^{2.67}} \left(\frac{nL}{2K\sqrt{S_o}}\right)^{1.60} \quad 4.45$$

Donde:

$T_R$  = ancho de esparcimiento regional

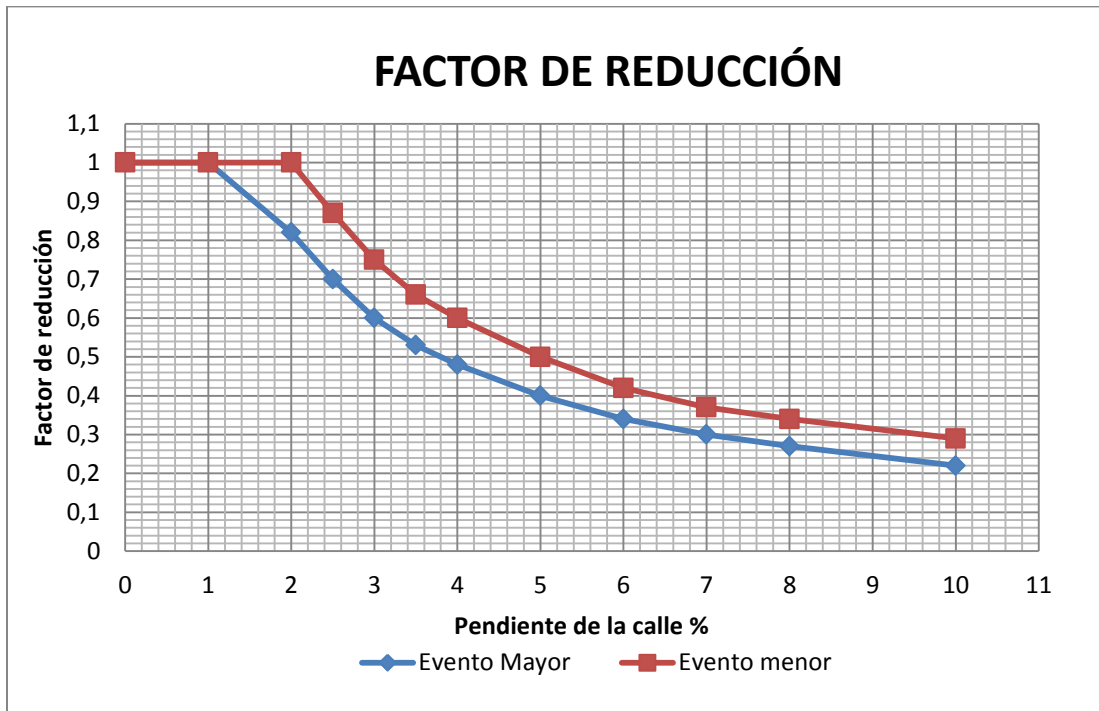


**Figura 4.12 Factor de reducción en función del ancho de esparcimiento y el producto VD, para una pendiente longitudinal  $S_o = 0,01$  (26)**

La ecuación 4.44 genera valores de  $R < 1$  para una calle empinada, indicando que la capacidad de la vía se debe reducir. Para calles con bajas pendientes puede resultar con valores de  $R > 1$ , señalando que la cuneta puede soportar mayor capacidad que la capacidad de diseño, sin exceder el producto VD permisible.

Existen dos conjuntos de factores de reducción desarrollados para áreas metropolitanas de Denver: uno para tormenta menor y otro para tormenta mayor. La figura 4.13 muestra que el factor de reducción se mantiene en 1,0 para una pendiente  $< 1,5\%$  y, luego, disminuye a medida que aumenta la pendiente de la calle.

La figura 4.13 se realizó con  $T_R = 12,5$  pies y  $L = 1,0$  pies<sup>3</sup>/s/pie para una tormenta menor y  $T_R = 20,5$  pies y  $L = 2,0$  pies<sup>3</sup>/s/pie para una tormenta mayor. El ancho regional de Denver implica una altura de lámina de agua para la condición de cunetas llenas de 5 pulgadas (0,127 m) para la tormenta menor y de 7 pulgadas (0,178 m) para la tormenta mayor.



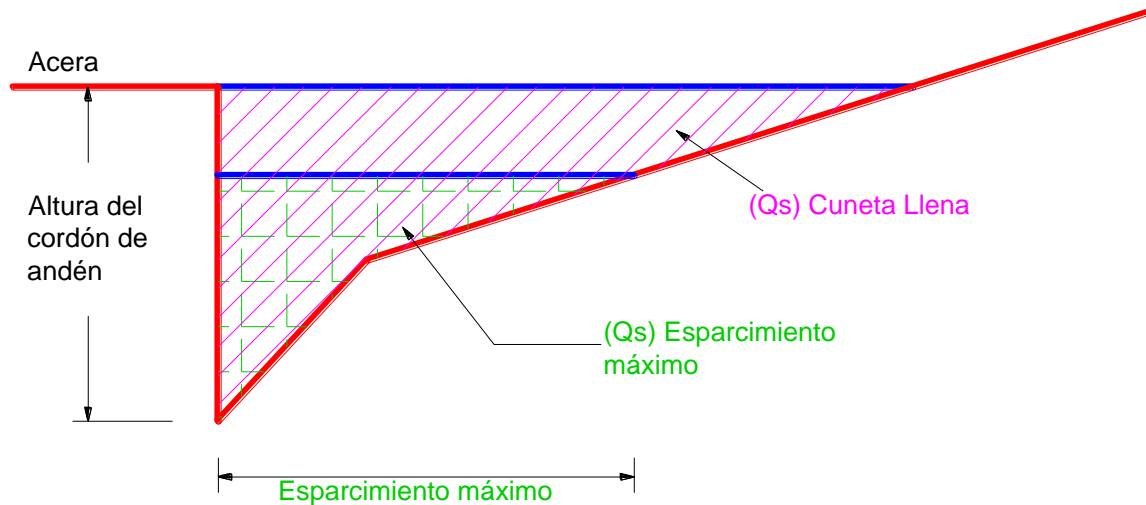
**Figura 4.13 Factor de reducción en función de la pendiente (26)**

En la práctica, la ecuación 4.1 se utiliza para calcular la capacidad de la calle a cuneta llena y luego aplicar el factor de reducción (tomando como referencia la figura 4.13).

#### 4.2.6.3. ***Capacidad hidráulica de una calle por el método de reducción (13)***

La capacidad hidráulica de la calle está definida por el esparcimiento máximo admisible y la capacidad de la cuneta llena está determinada por la altura del sardinel. Considerando la seguridad pública y el estacionamiento de los vehículos a lo largo de la vía durante la tormenta, entonces, la capacidad hidráulica admisible será la que sea menor entre la capacidad hidráulica de la calle y la capacidad a cuneta llena, multiplicada por un factor de reducción para tener en cuenta la reducción de la capacidad por autos estacionados, obstrucciones en la cuneta, olas y salpicaduras, definidos en las figuras 4.14 y 4.15.

$$(Q_S)_{\text{admisible}} = \text{Mínimo } ((Q_S)_{\text{esparcimiento máximo}}, (Q_S)_{\text{cuneta llena}} \times \text{Factor de reducción}) \quad (4.46)$$



**Figura 4.14 Capacidad hidráulica de la calle. (26)**

En el procedimiento de diseño primero se debe determinar la capacidad hidráulica admisible y luego ajustar la separación entre sumideros para asegurar que el caudal de diseño  $Q_p$  sobre la vía se evacúe sin exceder la capacidad admisible.

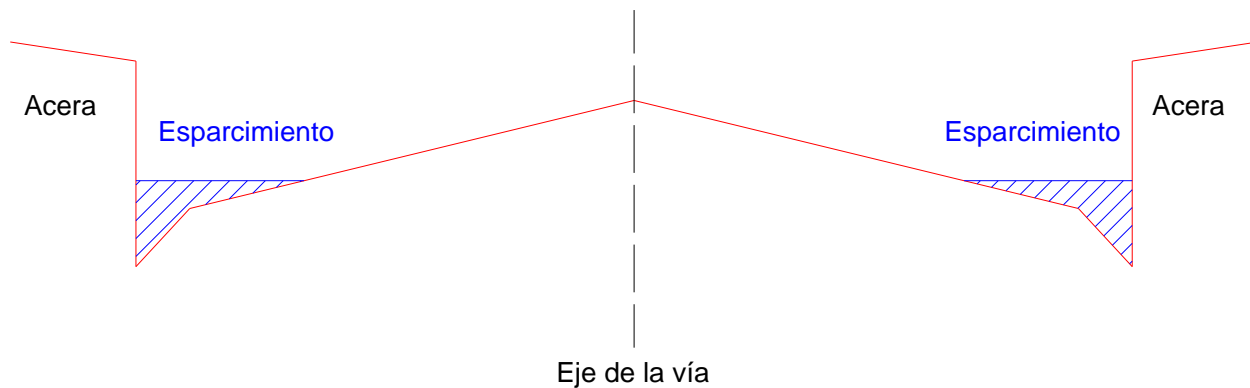
Existen dos aspectos relacionados con la capacidad hidráulica de las calles:

- (1) La eficiencia de la calle cuando se tiene un caudal dado.
- (2) El cálculo de la capacidad hidráulica de la calle a diferentes profundidades, cuando se conocen completamente las características geométricas de la vía.

### **1. Eficiencia de la calle para un caudal dado (tormenta menor)**

Como se muestra en la figura 4.15, para determinar la capacidad de la calle para un caudal dado se requieren el coeficiente de rugosidad  $n$ , el esparcimiento máximo  $T_{max}$ , la altura del sardinel  $H_c$  y las características geométricas de la cuneta, incluyendo  $S_x$ ,  $S_o$ ,  $D_s$ ,  $W$ , etc.

Si el esparcimiento calculado excede el esparcimiento máximo o la profundidad del flujo en la cuneta excede la altura del cordón de andén, se debe revisar el tamaño del área que se quiere drenar hasta que el esparcimiento satisfaga el criterio de diseño.



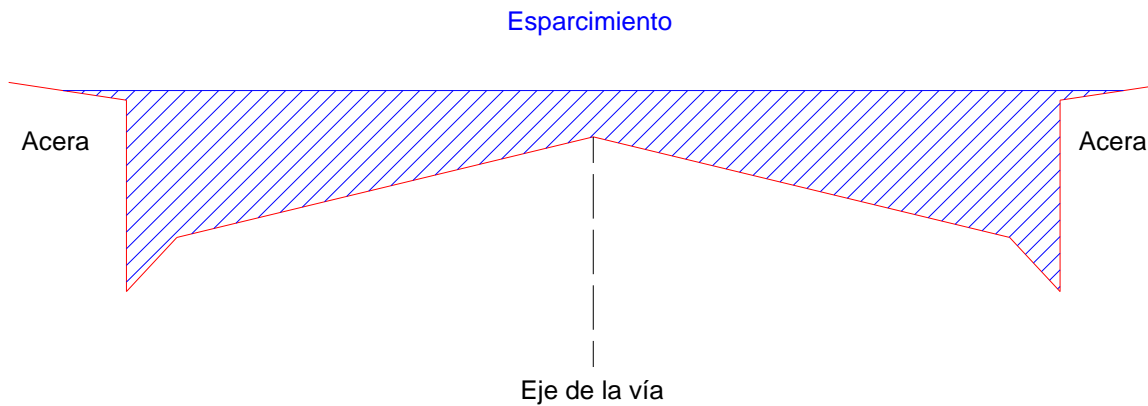
**Figura 4.15 Eficiencia hidráulica de una calle para un caudal dado**

## **2. Capacidad hidráulica de la calle para una sección de vía dada (tormenta mayor)**

La sección de vía se considera un canal abierto. Como la sección transversal geométrica está dada, la capacidad hidráulica de la calle que se muestra en la figura 4.15 se puede determinar con la ecuación 4.1 para ambas cunetas, la lateral derecha y la lateral izquierda.

Es conveniente construir un rango de curva que relacione la sección transversal de la calle con diferentes profundidades de agua, con incrementos de 2.5 cm.

En el rango de curva establecido se puede identificar de manera sencilla la profundidad del flujo y el ancho del esparcimiento para un mejor diseño del drenaje.



**Figura 4.16** Rango de la curva hidráulica de la calle. Descarga vs. Profundidad, para una sección transversal de calle dada

- **Ejemplo**

Calcular la capacidad máxima permitida para una vía con las siguientes características:

a. Datos:

✓ Geometría de la calle

Pendiente longitudinal de la vía $S_0$ [%]	=	3,00
Bombeo o pendiente transversal $S_x$ [%]	=	2,00
Máximo esparcimiento en la calle $T_m$ [m]	=	3,810

✓ Geometría de la cuneta

Depresión en la cuneta $D_s$ [m]	=	0,0508
Ancho de la cuneta $W$ [m]	=	0,6096
Altura del andén $H_c$ [m]	=	0,1524

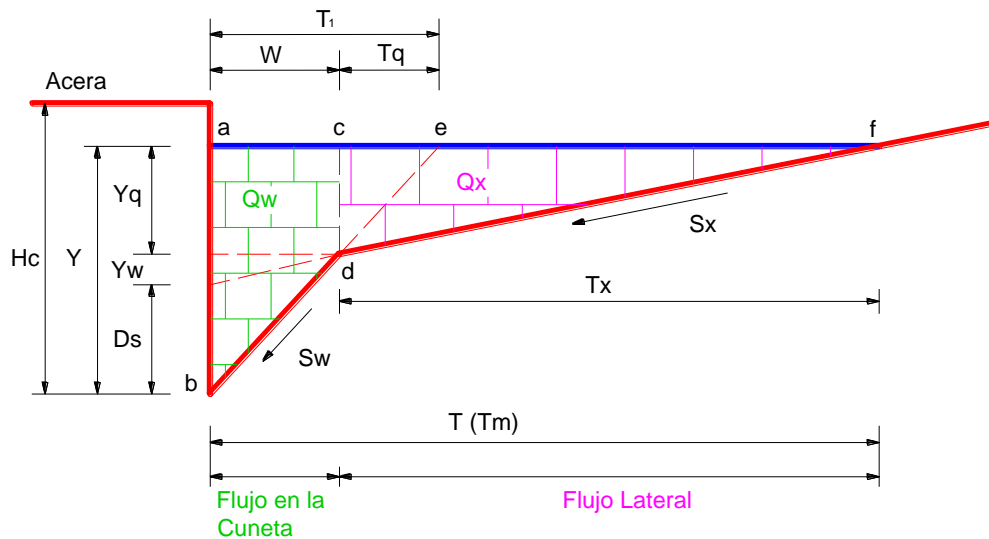
✓ Constantes

Coeficiente de rugosidad de Manning, $n$	=	0,016
--	---	-------

Factor de reducción capacidad de la vía, F = 0,74

El factor de reducción de capacidad de la vía se obtuvo de la figura 4.13 para una pendiente longitudinal  $S_o = 3\%$ .

b. Cálculo de la capacidad máxima de la calle



Como se trata de una calle con sección compuesta el caudal se debe calcular en la cuneta o flujo frontal,  $Q_w$ , y el caudal por la vía o flujo lateral,  $Q_x$ .

Utilizando la ecuación 4.1 y las modificaciones para una sección compuesta, resulta:

$$Q_s = Q_w + Q_x$$

$$Q_w = \frac{0.375}{n} s_w^{1.67} S_o^{0.5} (T_1 - T_q)^{2.67}$$

$$Q_x = \frac{0.375}{n} s_x^{1.67} S_o^{0.5} (T_x)^{2.67}$$



- ✓ Cálculo de la capacidad máxima de la calle, es decir, cálculo de la capacidad si la altura de lámina de agua,  $Y$ , es igual a la altura del sardinel,  $H_c$ .

Se calculan las variables necesarias para determinar la capacidad de la calle para una cuneta compuesta.

De la ecuación 4.30 se calcula la pendiente de la cuneta de sección compuesta,  $S_w$

$$S_w = S_x + \frac{D_s}{W} = \left(0,02 + \frac{0,0508}{0,6096}\right) * 100 = 10,33\%$$

Para el esparcimiento  $T_x$  se utiliza la ecuación 4.28

$$T = W + T_x$$

$$T = \frac{H_c - D_s}{S_x} = \frac{0,1524 - 0,0508}{0,02} = 5,08m$$

$$T_x = T - W = 4,47m$$

Cálculo del área a través de la ecuación 4.27

$$A_s = 0,5W(Y + Y_q) + 0,5Y_qT_x$$

$$Y_q = (T - W) * S_x = (4,47) * 0,02 = 0,0894m$$

$$A_s = 0,5 * 0,6096(0,1524 + 0,0894) + 0,5 * 0,0894 * 4,47 = 0,2735m^2$$

$$T_q = \frac{Y}{S_w} - W = \frac{0,1524}{0,1033} - 0,6096 = 0,8652m$$

$$Q_w = \frac{0,375}{0,016} 0,1033^{1,67} 0,03^{0,5} ((0,6096 + 0,8652) - 0,8652)^{2,67} = 0,0244m^3/s$$

$$Q_x = \frac{0.375}{0.016} * 0.02^{1.67} * 0.03^{0.5} * 4.47^{2.67} = 0.322m^3/s$$

$$Q_s = Q_w + Q_x = 0.346m^3/s$$

$$V_s = \frac{Q_s}{A_s} = \frac{0.349}{0.2735} = 1.265m/s$$

Para verificar el tipo de flujo sobre la vía se calcula el número de Froude, NF.

$$NF = \frac{V_s}{\sqrt{gD}}$$

$$D = \frac{A}{T}$$

$$NF = \frac{V_s}{\sqrt{\frac{gA}{T}}} = \frac{1.908}{\sqrt{9.81 * \frac{0.2735}{5.08}}} = 1.74$$

Esto indica que sobre la vía existe un flujo supercrítico.

- ✓ Cálculo de la capacidad para el esparcimiento máximo,

La pendiente transversal de la cuneta se calcula del mismo modo que para la capacidad máxima de la vía:

$$S_x = 10.33\%$$

El esparcimiento total será el esparcimiento máximo permitido:

$$T = 3.81m$$

$$T_x = T - W = 3.81 - 0.6096 = 3.2m$$

Cálculo de la lámina de agua para esta condición de esparcimiento máximo:

$$Y = T * S_x + D_s = 3,81 * 0,02 + 0,0508 = 0,127m$$

Cálculo del esparcimiento  $T_q$ :

$$T_q = \frac{Y}{S_w} - W = \frac{0,127}{0,1033} - 0,6096 = 0,6194m$$

$$Q_w = \frac{0,375}{0,016} 0,1033^{1,67} 0,03^{0,5} ((0,6194 - 0,6096) - 0,6194)^{2,67} = 0,0244m^3/s$$

$$Q_x = \frac{0,375}{0,016} * 0,02^{1,67} * 0,03^{0,5} * 3,2^{2,67} = 0,132m^3/s$$

$$Q_s = Q_w + Q_x = 0,156m^3/s$$

Cálculo de la velocidad de la cuneta  $V_s$ :

$$A_s = 0,5W(Y + Y_q) + 0,5Y_qT_x$$

$$Y_q = (T - W) * S_x = (3,81 - 0,6096) * 0,02 = 0,064m$$

$$A_s = 0,5 * 0,6096(0,127 + 0,064) + 0,5 * 0,064 * 3,2 = 0,1606m^2$$

$$V_s = \frac{Q_s}{A_s} = \frac{0,156}{0,1606} = 1,6646 m/s$$

Cálculo de la capacidad de la calle, de acuerdo con la ecuación 4.46:

$(Q_s \text{ admisible})$

$= \text{Min} ((Q_s \text{ esparcimiento máximo}), (Q_s) \text{ Cuneta llena } \times \text{Factor de reducción})$

$$Q_s \text{ admisible} = \text{Min} ((0,156), ((0,346 * 0,74)))$$

$$Q_s \text{ admisible} = \text{Min} ((0,156; 0,256))$$

El caudal admisible de la vía es el que se calcula para el esparcimiento máximo:

$$Q_s \text{ admisible} = 0,156\text{m}^3/\text{s}$$

La lámina de agua sobre la estructura de entrada es la profundidad normal:

$$y_n = 0,127\text{m}$$

#### 4.3. Sumideros

En el drenaje de una calle el agua se va acumulando y fluye por las cunetas, lo cual produce un incremento del ancho de esparcimiento en la dirección del flujo. En el punto donde el agua esparcida alcanza el valor de diseño se debe colocar un sumidero para que capture parte o la totalidad del flujo, de tal manera que controle el ancho de esparcimiento. Cuando no se captura la totalidad del flujo, parte del que transporta la cuneta pasa a la siguiente cuneta, considerando que la captación sea eficiente, porque resulta costoso hacer entradas de dimensiones variables y tan anchas como el esparcimiento lo requiera.

La capacidad hidráulica de un sumidero depende de su geometría, de las características del flujo en la cuneta, de la cantidad de agua transportada y de la cantidad de agua que puede entrar a los colectores de aguas lluvias. Un sumidero con una capacidad inadecuada o una mala ubicación puede causar inundación en el borde de la carretera, generando riesgo para los viajeros.

Los sumideros son las estructuras que se utilizan más comúnmente para incorporar el escurrimiento superficial a los colectores. Dependiendo de la forma como se realice la captación del agua, la práctica usual los clasifica en sumideros de rejilla, laterales, combinados y ranurados. Cada uno de esos tipos posee características específicas,

condiciones de flujo y campo de aplicabilidad en el proyecto de un sistema de drenaje urbano.

La capacidad de intercepción de los sumideros y su eficiencia disminuye a medida que aumenta la cantidad de flujo. La profundidad del agua continua a los cordones de andén es el mayor factor en la capacidad de intercepción de las estructuras de entrada.

Para diseñar un sumidero de rejilla sobre una pendiente es necesario seleccionar primero el tipo de rejilla, el largo, el ancho y la relación escombros-obstrucción. También se deben conocer las dimensiones del área abierta de la rejilla y la profundidad del sumidero.

Los sumideros laterales son relativamente libres de tendencias de obstrucción y ofrecen poca interferencia con la operación del tráfico, por esta razón se les debe considerar como una buena alternativa; además, porque la instalación de rejillas en varios lugares resulta incómoda para peatones y ciclistas. Las dimensiones de un sumidero lateral incluyen el largo y el ancho. Cuando está localizado en una depresión se requiere información adicional sobre la depresión lateral.

Los sumideros combinados están compuestos por dos entradas, un sumidero de rejillas y uno lateral. Para ciertas condiciones de diseño, la capacidad de interceptación del flujo en un sumidero combinado se debe calcular con la suma de las cantidades de los flujos interceptados por las rejillas y por la ventana.

Los sumideros ranurados son entradas de drenaje efectivos sobre rampas de vías o alrededor de tramos en depresión. Operan igual que los sumideros laterales cuando la amplitud de la ranura es más abierta que 1.75 pulgadas. La capacidad de interceptación del flujo para un sumidero ranurado está sujeta a la obstrucción por escombros.

Los parámetros de diseño para entradas en una pendiente de estos sumideros incluyen amplitud, longitud y obstrucción de escombros. La profundidad del sumidero es un requerimiento adicional para una entrada ranurada en una depresión.

#### 4.3.1. Localización de las entradas hidráulicas del drenaje urbano (8)

**(26) (13) (11)**

La ubicación de los sumideros la determinan básicamente los controles geométricos que exigen entradas en sitios específicos; por su uso, por la ubicación en curvas verticales cóncavas o puntos bajos y por el criterio de esparcimiento máximo del agua sobre el pavimento.

Para determinar la ubicación adecuada de entradas en un proyecto se requiere la siguiente información:

- ✓ Un esquema o plano adecuado para definir las áreas de drenaje.
- ✓ Perfil longitudinal de la vía.
- ✓ Secciones transversales típicas.
- ✓ Clasificación de secciones transversales.
- ✓ Cotas de pavimento de la vía (peraltaje).
- ✓ Mapas de contorno.
- ✓ Curvas de intensidad, duración, frecuencia (IDF).

Por lo general, los sumideros están localizados en un área de drenaje o a lo largo de la calle, con distancias de 92 a 121 metros entre ellos. Se debe tener en cuenta que las entradas típicas están localizadas en una sección de la cuneta donde se drena un área suficiente para generar el esparcimiento máximo recomendado, donde se evacúa el transporte de escorrentía total o parcial del esparcimiento.

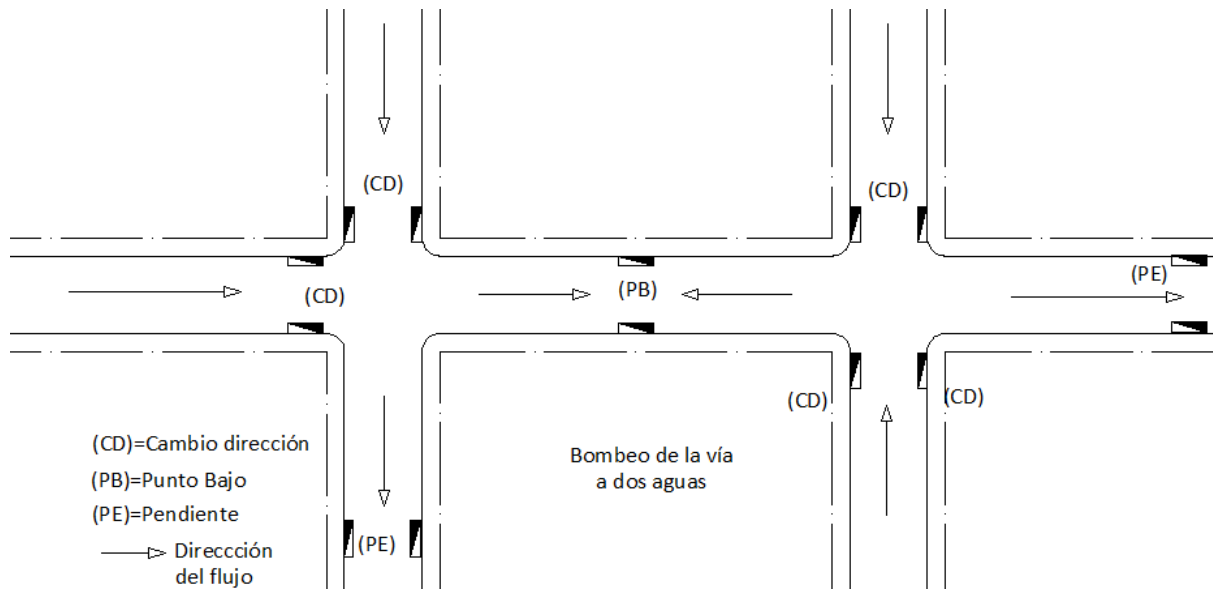
Existe un número de puntos donde es indispensable ubicar entradas para contribuir al drenaje del área, los cuales se pueden definir en un plano antes de cualquier tipo de cálculo. A continuación se dan algunos ejemplos de tales ubicaciones:

- ✓ Para todos los puntos depresivos en la pendiente de la cuneta.

- ✓ Inmediatamente aguas arriba de quiebres, entradas/salidas de rampas, intersección de calles; por ejemplo, en los sitios donde el agua pueda fluir sobre la vía a la que se llega.
- ✓ Inmediatamente pendiente arriba de puentes (para prevenir el drenaje de la vía sobre la calzada del puente).
- ✓ Inmediatamente aguas abajo de los puentes (para interceptar el drenaje de la calzada del puente).
- ✓ Inmediatamente pendiente arriba de la inversión de las pendientes transversales.
- ✓ Al final de los canales, en las secciones de corte (drenaje rural).
- ✓ Al costado de la calle inmediatamente pendiente arriba de las intersecciones.
- ✓ Detrás de los cordones de andén, bermas o vías peatonales, para drenar pequeñas áreas.
- ✓ Donde se reduzca la pendiente longitudinal.
- ✓ Con la información de las secciones transversales del proyecto, verificar si es necesario ubicar sumideros a cada lado de la calle.
- ✓ En intersecciones para impedir el flujo transversal, pueden crearse depresiones con aguas estancadas, de manera que se garantice la completa captación de las aguas.
- ✓ No localizar sumideros que interfieran con otros servicios públicos.
- ✓ Verificar que no existan árboles grandes cerca a la ubicación del sumidero, las raíces pueden perturbar su eficiencia de intercepción o dañarlo.

Adicionalmente, las áreas de drenaje que escurren hacia las autopistas se pueden interceptar con canales al borde de la carretera, cunetas, zanjas o entradas antes de alcanzar la vía. Esto se aplica al drenaje de cortes de pendientes al costado de la calle y otras áreas a lo largo del pavimento.

En el caso particular del drenaje urbano existen dos reglas fundamentales que definen el número mínimo de sumideros y los puntos en los que obligatoriamente se deben colocar al iniciar el diseño: a) en puntos bajos de la pendiente longitudinal de la vía (PB) y b) en ciertos puntos para evitar que la escorrentía superficial cambie de dirección (CD) y en pendiente (P). La figura 4.17 ilustra la ubicación mínima de los sumideros.



**Figura 4.17 Disposición de entradas en una calle**

Existen dos factores importantes a la hora de calcular la capacidad hidráulica de los sumideros: 1) el esparcimiento máximo permitido sobre la calle y 2) la pendiente longitudinal de la calle donde se ubicará el sumidero. El escurrimiento en una depresión funciona como un vertedero con poca profundidad de agua o como un orificio bajo condiciones de sumergencia.

Cuando el sumidero se ubica en una calle en pendiente el agua de lluvia se extiende desde la corona hacia la acera-calle, la eficiencia de intercepción de un sumidero localizado en pendiente depende del ancho de esparcimiento permitido y de las condiciones hidráulicas de la cuneta. Por lo general, entre más pronunciada sea la pendiente de la vía, menor será la capacidad de intercepción en el sumidero. Si un sumidero está localizado en un punto bajo, entre más profundo esté el agua frente a la estructura de entrada mayor será su capacidad de intercepción. Antes de diseñar un sumidero es importante verificar si se localiza en un punto bajo o en pendiente (26).



### 4.3.2. Hidráulica de los sumideros (8) (27) (26)

La ubicación de la estructura de entrada define su capacidad hidráulica. Para sumideros localizados en puntos bajos de la vía, su capacidad hidráulica se calcula igual a la capacidad de un vertedero cuando la lámina de agua sobre la estructura de entrada es baja, o como orificio si el sumidero funciona bajo condiciones sumergidas. La capacidad de los sumideros en tramos de vía en pendiente la definen las características hidráulicas de la cuneta y el esparcimiento máximo permitido sobre la vía.

#### 4.3.2.1. *Capacidad de interceptación y eficiencia de los sumideros sobre un tramo de vía con pendiente (8) (27) (26)*

Bajo ciertas condiciones, la capacidad de interceptación de entrada es el flujo que intercepta un sumidero y su eficiencia es el porcentaje del flujo total que intercepta sobre la cuneta. La eficiencia del sumidero depende de los cambios en la pendiente transversal, de la pendiente longitudinal, del flujo total en la cuneta y, en menor medida, de la rugosidad del pavimento. En forma matemática, la eficiencia E se define por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{Q_i}{Q_s} \quad (4.47)$$

Donde:

$Q_s$  = caudal total de la calle, ( $m^3 / s$ )

$Q_i$  = flujo interceptado, ( $m^3 / s$ )

El flujo que no intercepta el sumidero se denomina de arrastre o de derivación,  $Q_b$ :

$$Q_b = Q_s - Q_i(1 - C) \quad (4.48)$$

Siendo C un factor de obstrucción.

La capacidad de interceptación de todas las configuraciones de entrada aumenta con caudales cada vez mayores y la eficiencia de entrada generalmente disminuye con el aumento del caudal. Los factores que afectan el flujo de la cuneta o el flujo lateral también afectan la capacidad de interceptación del sumidero.

#### 4.3.2.2. **Capacidad de interceptación de los sumideros en un punto bajo o en una depresión (8)(27)(26)**

Los sumideros ubicados en lugares bajos funcionan como vertederos en condiciones de poca altura y como orificios a mayores profundidades. La condición hidráulica como orificio comienza a profundidades que dependen del tamaño de la rejilla, de la altura del bordillo de apertura o del ancho de la ranura de la entrada, según sea el caso. A profundidades donde la condición hidráulica de las estructuras prevalece como vertedero y como orificio, el flujo está en una etapa de transición. A estas profundidades, el control está mal definido y el flujo puede fluctuar entre vertedero y orificio.

La eficiencia de los sumideros en lugares bajos es crítico, debido a la escorrentía que entra en el punto bajo y que debe pasar a través de la entrada. La obstrucción total o parcial de los sumideros en estos lugares puede generar condiciones peligrosas de estancamiento.

#### 4.3.3. **Factor de obstrucción (26)**

Durante un evento de lluvia, los escombros sobre la vía son arrastrados a las estructuras de entrada por el volumen de escorrentía del primer lavado, colmatándolas. La obstrucción de dichas estructuras cambia significativamente el caudal de captación, por lo cual para su diseño se hace necesario predecir el nivel de colmatación a la que puede estar sometida la estructura por medio de un factor de obstrucción.

La selección del factor de obstrucción depende de la cantidad y los tipos de residuos de basura en la calle. En el drenaje de una vía, para el diseño de un sumidero de rejilla es común considerar una obstrucción del 50% y para un sumidero lateral del 10% (Departamento de Transporte de Colorado, 1990).

A menudo se necesitan varias unidades para recoger las aguas pluviales en la calle. Puesto que la cantidad de desechos se asocia en gran medida con el volumen de esorrentía del primer lavado, el factor de obstrucción que se aplica a un sumidero de unidad múltiple se reduce con respecto a su longitud. Aplicar linealmente un factor de obstrucción de una sola unidad a un sumidero de unidades múltiples da lugar a una longitud excesiva. Por ejemplo, una entrada de seis unidades bajo un factor de obstrucción del 50% funciona como una entrada de tres unidades. Con el concepto del primer lavado, la reducción del factor de obstrucción para el número de unidades se presenta como:

$$C = \frac{1}{N} (C_o + eC_o + e^2C_o + e^3C_o + \dots \dots + e^{N-1}C_o) = \frac{C_o}{N} \sum_{i=1}^N e^{i-1} \quad (4.49)$$

Donde:

C = factor de obstrucción de unidades múltiples para una entrada con varias unidades

$C_o$  = factor de obstrucción para una sola unidad

e = índice de disminución, menor que la unidad

N = número de unidades

La capacidad de captación del sumidero no se incrementa linealmente con el número de unidades, sino que presenta un rendimiento decreciente para cada unidad añadida. Por ejemplo, la segunda unidad sólo puede atrapar el 50% de la capacidad de la primera. El valor de "e" se puede estimar por la capacidad incremental por cada unidad añadida al sumidero. Cuando N es grande, la ecuación 4.49 converge hacia

$$C = \frac{C_o}{N(1 - e)} \quad (4.50)$$

Para casos en los que  $e = 0,25$  y  $C_o = 50\%$ ,  $C = 0,67 / N$  para un gran número de  $N$ . Esta ecuación aplica para un sumidero de unidades múltiples.

Durante una sola unidad de entrada, en la ecuación 4.50 resulta  $C = C_o$ , para un sumidero de unidades múltiples el valor de  $C_o$  decae con respecto al número de unidades o la longitud del sumidero.

Se evaluó la experiencia de campo recomendada por Adams Country en el estado de Colorado. La tabla 4.2 indica que el factor de obstrucción predicho para los sumideros de ventana y rejilla coinciden cuando  $e = 0,25$ .

**Tabla 4.2 Comparación entre los factores de obstrucción predichos y observados (26)**

Número de unidades	Sumidero lateral		Sumidero de rejilla	
	Observado	Predichos $e=0,25$	Observado	Predichos $e=0,25$
1	0,12	0,12	0,5	0,5
2	0,08	0,08	0,35	0,31
3	0,05	0,05	0,25	0,21
4	0,03	0,04	0,15	0,16

La interceptación de un sumidero en pendiente es proporcional a su longitud y en un punto bajo o depresión es proporcional al área del sumidero lateral.

Por lo tanto, se aplica un factor de obstrucción a la longitud de un sumidero en una vía con pendiente como:

$$L_e = (1 - C)L \tag{4.51}$$

Donde  $L_e$  = longitud efectiva (sin obstrucciones).

De manera similar, se aplica un factor de obstrucción al área de apertura de un sumidero en punto bajo o depresión como:

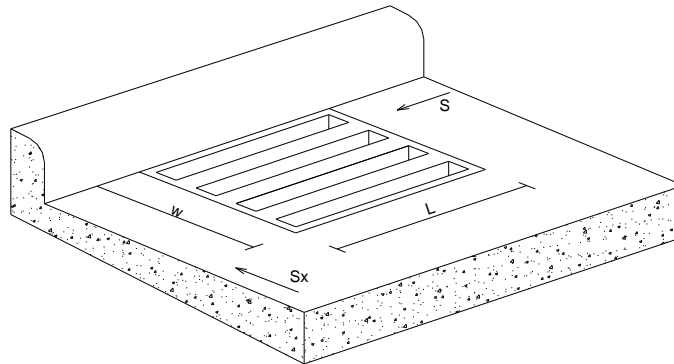
$$A_e = (1 - C)A \quad (4.52)$$

En la que  $A$  = área de la abertura y  $A_e$  = área de abertura libre de obstrucciones.

#### 4.3.4. Sumideros de rejilla (8) (13) (11) (27) (26)

En un tramo de vía con pendiente, la capacidad de intercepción de un sumidero de rejilla depende de la cantidad de agua que fluye sobre la salida, del tamaño y la configuración de la rejilla y de la velocidad del flujo en la cuneta.

Los sumideros de rejilla en curvas verticales cóncavas o puntos bajos operan como vertederos en estancamientos pequeños y como orificios en grandes profundidades. En profundidades de flujo ocurre una transición de los vertederos a los orificios. La localización de un sumidero de rejilla en un punto bajo de la calzada equivale hidráulicamente a la descarga por un orificio, dependiendo de la capacidad del área del orificio y de la profundidad o carga de agua sobre la reja.



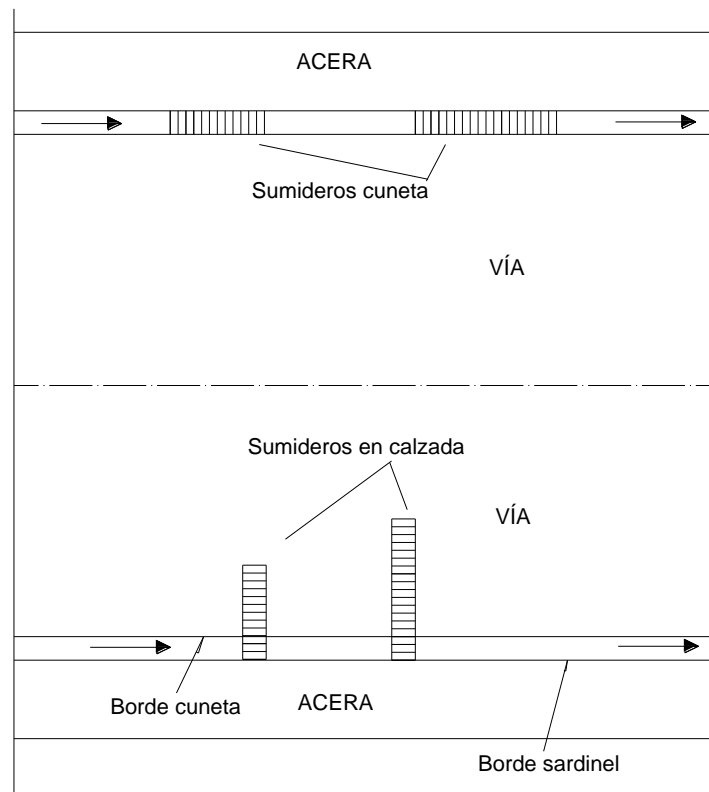
**Figura 4.18 Sumidero de rejilla. (8)**

Estos sumideros no se recomiendan para puntos bajos o una depresión, por la tendencia al taponamiento de sus rejillas. Para estos lugares se recomiendan los sumideros combinados o los laterales.

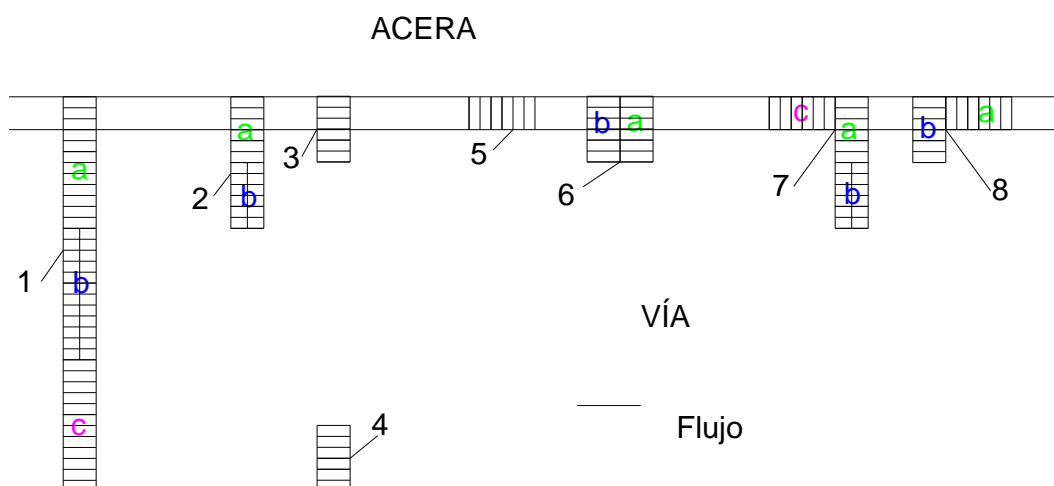
Este tipo de sumideros actúa satisfactoriamente en varias clases de cunetas, pero pierden capacidad con el incremento de la pendiente. Una gran desventaja que presentan es la obstrucción o atascamiento que se produce por la acumulación de basuras o sedimentos en la rejilla, lo cual afecta su capacidad a cierta profundidad. Las rejillas son entradas de drenaje efectivas en autopistas que no presentan un problema mayor cuando se obstruyen, ya que su limpieza es muy sencilla, pero sí requieren un mantenimiento frecuente. Además, donde existe tráfico de bicicletas las rejillas deben ser seguras (la distancia de separación entre los elementos que la componen debe ser lo suficientemente estrecha para asegurar el tráfico de las bicicletas, pero hidráulicamente eficiente).

De acuerdo con la referencia (11), las siguientes son algunas recomendaciones adicionales para el uso de este tipo de sumideros:

- ✓ Utilizarlos preferiblemente en calles o avenidas de pendientes pronunciadas (de 3% o más), en cunetas y pequeños canales laterales.
- ✓ En lo posible, deben evitarse en vías arteriales o distribuidoras. Cuando se utiliza más de una reja se deben disponer de acuerdo con las indicaciones establecidas (figura 4.20).
- ✓ Por razones de captación de desperdicios, debe utilizarse el doble del área requerida para la captación, en particular cuando se utilizan barras inclinadas. Como se mencionó, una obstrucción general para este tipo de sumidero es del 50%.
- ✓ Cuando las barras ocupen parcial o totalmente la calzada no se deben emplear sumideros deprimidos.
- ✓ No deben utilizarse en puntos bajos, a menos que no sea posible utilizar el sumidero tipo ventana. En este caso, debe proveerse el doble del área necesaria. Se recomienda el uso de sumideros de tamaños estándar con el fin de disminuir costos.
- ✓ Su ubicación en la calle puede ser sobre la calzada o sobre la cuneta, como se presenta en la figura 4.19.



**Figura 4.19 Ubicación de las rejillas (11)**



**Figura 4.20 Disposición de las rejillas en la calle (11)**

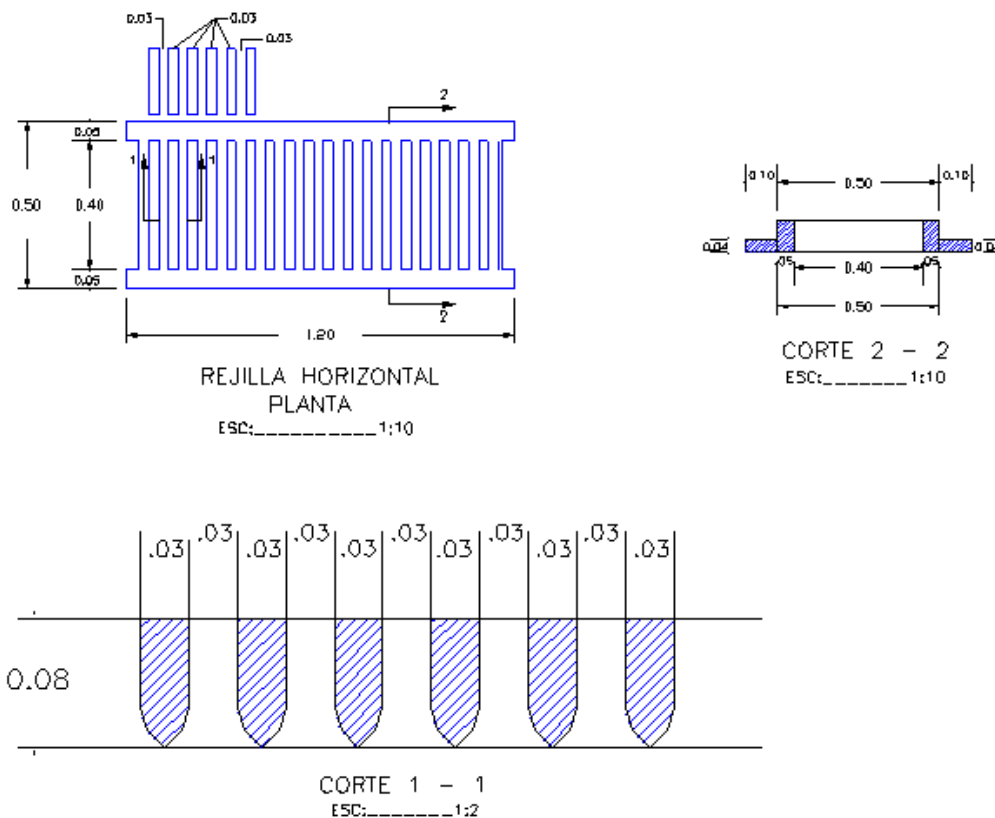
A continuación se presentan las recomendaciones para la disposición de las rejillas según su tipo, como se muestra en la figura 4.20:

1. Esta ubicación se recomienda si la pendiente transversal de la calzada es casi nula y no genera molestias para el tráfico vehicular. Si lo hace pueden utilizarse otras disposiciones de rejillas, como la 3 o la 6.
2. Se recomienda cuando la pendiente transversal es moderada y la reja C capta menos del 20% del total; igualmente, no debe generar molestias al tráfico, si lo hace debe utilizarse la ubicación 1.
3. Deseable cuando la pendiente transversal es mayor al 1% o cuando en la disposición 2 la rejilla b no capta más del 30% del total.
4. Indeseable de cualquier modo.
5. Se utiliza cuando la disposición 3 genera molestias al tráfico.
6. Deseable cuando la disposición 3 no es suficiente para captar todo el gasto necesario. En esta ubicación la rejilla b es más eficiente que en las disposiciones 1 y 2, excepto en pendientes transversales pequeñas.
7. Indeseable, las rejillas c y b son ineficientes.
8. Indeseable, la rejilla b es ineficiente.

Las rejillas facilitan efectivamente el drenaje de carreteras en los lugares donde la obstrucción con desechos no es un problema. Según las variaciones de espaciamiento y de trazado de las barras de acero, las rejillas utilizadas en los sumideros están divididas en nueve clases:

- (1) rejilla barra paralela P-1-7/8.
- (2) rejilla barra paralela P-1-1/8.
- (3) rejilla paleta curva.
- (4) rejilla barra inclinada 45°.
- (5) rejilla barra de seguridad paralela P-1-7/8.
- (6) rejilla barra inclinada 30°.
- (7) rejilla reticulada.
- (8) rejilla tipo 16.
- (9) rejilla no estándar.





**Figura 4.21 Dimensiones de una rejilla estándar. (8)**

En este tipo de sumideros el agua que fluye por la vía se intercepta mediante una reja constituida por pletinas metálicas, separadas por una distancia tal que, sin afectar el tráfico, permitan una máxima captación del escurrimiento. El agua es conducida a los colectores desde el canal recolector inferior del sumidero de reja hasta el sitio de disposición final.

Desde el punto de vista hidráulico, generalmente el flujo puede asimilarse a un flujo espacialmente variado con descarga de fondo. Sin embargo, la compleja configuración del movimiento, la dificultad de una cuantificación precisa del coeficiente de descarga de fondo y la gran variedad de dimensiones y formas de las pletinas que se utilizan desalientan cualquier intento por desarrollar un procedimiento general para el proyecto hidráulico de este tipo de sumideros.

#### 4.3.4.1. **Sumideros de rejilla sobre un tramo de vía en pendiente**

**(13) (26)**

Empleando la ecuación 4.47, la relación de un flujo frontal en la cuneta,  $Q_w$ , para el flujo en la calle,  $Q_s$ , está determinado por:

$$E_w = \frac{Q_w}{Q_s} = \left(\frac{S_w}{S_x}\right)^{1.67} \left\{ \left(\frac{T_1}{T_x}\right)^{2.67} - \left(\frac{T_1-W}{T_x}\right)^{2.67} \right\} \quad (4.53)$$

Donde:

$E_w$  = relación entre el flujo frontal transportado por el ancho de cuneta,  $Q_w$ , y el flujo en la calle,  $Q_s$ .

Para una pendiente transversal recta, sin depresión en la cuneta, se tiene  $S_w=S_x$  y  $T_1=T_x$ . Como resultado, la ecuación anterior se reduce a:

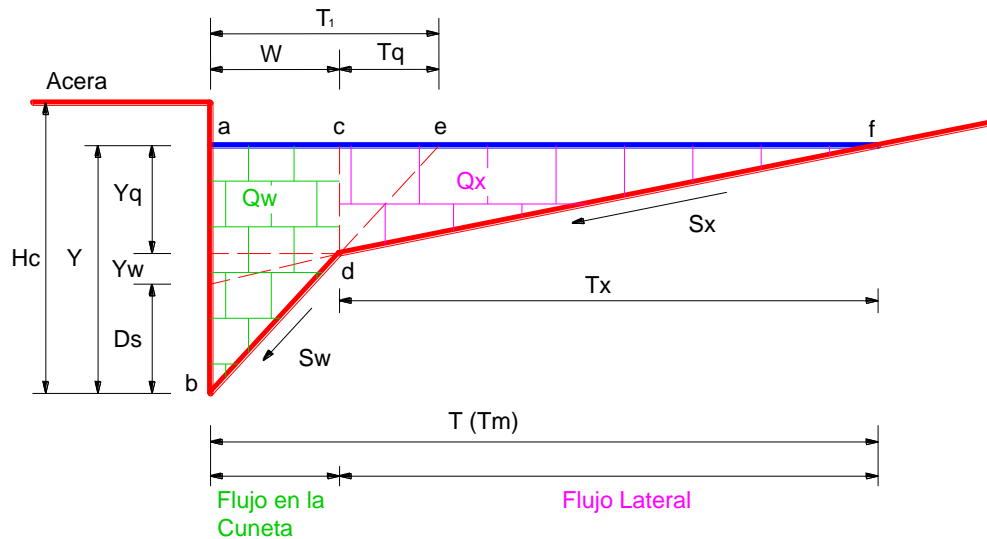
$$E_w = 1 - \left(1 - \frac{W}{T}\right)^{2.67} \quad (4.54)$$

La relación de flujo lateral,  $Q_x$ , para el flujo en la calle,  $Q_s$ , es:

$$E_x = \frac{Q_x}{Q_s} = 1 - E_w \quad (4.55)$$

Donde:

$E_x$  = relación entre el flujo lateral,  $Q_x$ , y el flujo en la calle,  $Q_s$ .



**Figura 4.22 Parámetros de la calle**

La intercepción de flujo frontal por una rejilla está determinada por la velocidad del flujo en la cuneta, la velocidad de salpicadura y la longitud de la rejilla. Los resultados de pruebas de laboratorio demuestran que las rejillas interceptan la totalidad del flujo frontal hasta cierta velocidad, cuando el agua comienza a salpicar sobre la rejilla. A velocidades superiores al salpicado (splash-over) la eficiencia de intercepción del flujo frontal en la rejilla disminuye.

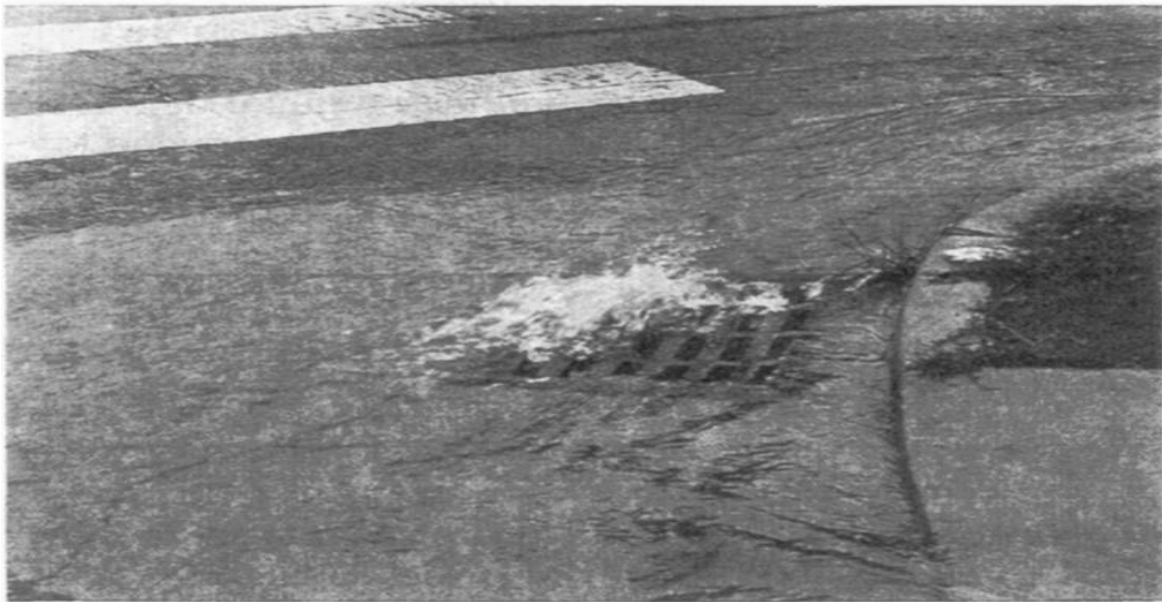
La velocidad de salpicadura es la velocidad bajo una rejilla obstruida, que gracias al análisis de regresión realizado en el laboratorio se logró determinar como  $V_o$ , a partir de una fórmula empírica en función de la longitud y del tipo de rejilla:

$$V_o = p + qL - rL^2 + sL^3 \quad (4.56)$$

Donde  $p$ ,  $q$ ,  $r$  y  $s$ , listados en la tabla 4.3, son constantes empíricas para varios sumideros de rejilla. La Figura 4.23 muestra la velocidad de salpicadura sobre la rejilla  $V_o$  (m/s) observada durante una tormenta.

**Tabla 4.3 Velocidad de salpicadura sobre varios tipos de rejillas (13)**

Número	Tipo de rejilla	p	q	r	s
1	Barra P-1-7/8	0.6767	4.0300	2.1325	0.6458
2	Barra P-1-1/8	0.5364	3.1200	1.4764	0.3229
3	Pletinas	0.0914	4.8500	4.2979	1.6146
4	Barra 45°	0.3018	2.6400	1.1811	0.3229
5	Barra P-1-7/8-4	0.2256	2.4400	0.8858	0.2153
6	Barra 30°	0.1554	2.3400	0.6562	0.1076
7	Reticulada	0.0853	2.2800	0.5906	0.1076



**Figura 4.23 Salpicadura en rejillas**

El porcentaje de intercepción del flujo frontal,  $R_f$ , se expresa:

Sí  $V_s > V_o$ , entonces

$$R_f = 1 - K_c(V_s - V_o) \quad (4.57)$$

Si no

$$R_f = 1$$

Donde:

$V_s$ = velocidad del flujo en la cuneta (m/s), como se describe en la ecuación 4.29

$K_C$ = coeficiente según las unidades que se deben emplear, S.I 0.295 y U.S.C 0.09

El porcentaje de intercepción del flujo lateral,  $R_s$ , se expresa:

$$R_s = \frac{1}{1 + \frac{0.0828V_s^{1.8}}{S_x L^{2.3}}} \quad (4.58)$$

Donde:

$V_s$ = velocidad del flujo en la cuneta (m/s)

$S_x$ = pendiente transversal de la vía (m/m)

$L$ = longitud de la rejilla (m)

Como resultado, la capacidad total de intercepción ideal de un sumidero de rejilla es igual a:

$$Q_i = EQ_s = R_f Q_w + R_s Q_x = [R_f E_w + R_s (1 - E_x)] Q_s \quad (4.59)$$

La capacidad de un sistema múltiple de sumideros de rejilla se aumenta por el número de rejillas. La capacidad ideal determinada por la ecuación 4.59 está sujeta a un factor de obstrucción debido a escombros, sedimentos o basuras en la vía.

Aplicando el factor de obstrucción al área de la rejilla, la capacidad de intercepción real será:

$$Q_a = Q_i (1 - C) \quad (4.60)$$

El factor de obstrucción para sumideros de rejilla es generalmente igual a 0.5.

Sin embargo, es preferible asignarle el factor de obstrucción a la longitud de la rejilla del siguiente modo:

$$L_e = L * (1 - C) \quad (4.61)$$

Donde  $L_e$  es la longitud efectiva de la rejilla.

- **Ejemplo. Cálculo de la capacidad de un sumidero de rejilla en pendiente**

Determinar la capacidad de intercepción de un sumidero de rejilla ubicado en pendiente, en una calle con las mismas características del ejemplo que se presentó para calcular la capacidad de una calle en el numeral 4.2.6. La rejilla tiene las siguientes características:

a. Datos

✓ Calle

Pendiente longitudinal de la vía  $S_0$  [%] = 3,00

Bombeo o pendiente transversal  $S_x$  [%] = 2,00

✓ Capacidad de la vía

Flujo frontal transportado por ancho cuneta  $W$   $Q_W$  [m<sup>3</sup>/s] = 0,1343

Flujo lateral transportado por ancho vía  $Q_X$  [m<sup>3</sup>/s] = 0,1331

Flujo transportado por la calle  $Q_{smc}$  [m<sup>3</sup>/s] = 0,2674

Velocidad del flujo  $V_s$  [m/s] = 1,6646

✓ Constantes

Factor de obstrucción de rejilla  $C$  = 0,5000

✓ Geometría de la rejilla

\*Tipo de rejilla (1-7) = 3,0

Número de rejillas = 1,0

Ancho de rejilla W[m]	=	0,570
Longitud de la rejilla L[m]	=	1,0

\*El tipo de rejilla se define de acuerdo con la tabla 4.3 Una rejilla tipo 3 es de pletinas.

b. Cálculo de la capacidad de intercepción del sumidero

Relación del flujo frontal,  $E_w$

$$E_w = \frac{Q_w}{Q_s} = \frac{0,1343}{0,2674} = 0,5024$$

Relación del flujo lateral,  $E_x$

$$E_x = 1 - E_w = 1 - 0,5024 = 0,4976$$

Velocidad de salpicadura,  $V_o$

La velocidad de salpicadura depende directamente del tipo de rejilla. Para una rejilla de pletinas las constantes para el cálculo de la velocidad de salpicadura, de acuerdo con la tabla 4.3, son:

$$p = 0,0914$$

$$q = 4,8500$$

$$r = 4,2979$$

$$s = 1,6361$$

La velocidad de salpicadura será entonces:

$$V_o = p + qL - rL^2 + sL^3$$

$$V_o = 0,0914 + 4,85 * 1 - 4,2978 * 1^2 + 1,6361 * 1^3 = 2,26m/s$$

Porcentaje de intercepción del flujo frontal,  $R_f$

Sí  $V_s > V_o$ , entonces

$$R_f = 1 - K_c(V_s - V_o)$$

Si no  $R_f = 1$

Para este caso

$$V_s > V_o \rightarrow 1,66 > 2,26 \text{ No}$$

Así que  $R_f = 1$

Porcentaje de intercepción del flujo lateral,  $R_s$

$$R_s = \frac{1}{1 + \frac{0,0828V_s^{1,8}}{S_x L^{2,3}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,0828 * 1,66^{1,8}}{0,02 * 1^{2,3}}} = 0,088$$

La capacidad de intercepción ideal es:

$$Q_i = [R_f E_w + R_s(1 - E_w)]Q_s$$

$$Q_i = [1 * 0,5024 + 0,088 * (0,4976)]0,2674 = 0,1461m^3/s$$

Capacidad de intercepción aplicando el factor de obstrucción al caudal

$$Q_a = Q_i * (1 - C) = 0,0730 * (1 - 0,5) = 0,073m^3/s$$



Ahora, haciendo el mismo cálculo de la capacidad de intercepción del sumidero de rejilla en pendiente, pero aplicando el factor de obstrucción a la longitud de la estructura, resulta:

$$L_e = L * (1 - C) = 1 * (1 - 0,5) = 0,5m$$

Siguiendo el mismo procedimiento

Velocidad de salpicadura de la rejilla, $V_o$ [m/s]	=	3,7954
Porcentaje de intercepción del flujo frontal, $R_f$	=	1,0000
Porcentaje de intercepción del flujo lateral, $R_s$	=	0,0192
Capacidad de intercepción con la longitud efectiva, $L_e Q_a$ [m <sup>3</sup> /s]	=	0,1369

La capacidad de intercepción de la rejilla depende directamente de su longitud. Es necesario aplicar el factor de obstrucción a la longitud de la rejilla, de este modo se tiene en cuenta el caso más desfavorable.

#### 4.3.4.2. **Sumideros de rejilla sobre un punto bajo o una depresión (13) (26)**

Un sumidero de rejilla en una depresión opera como un vertedero bajo una pequeña profundidad. Esta capacidad se estima así:

$$Q_i = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} P_e (Y + Y_s)^{1.5} \quad (4.62)$$

o

$$Q_i = C_w P_e (Y + Y_s)^{1.5} \quad (4.63)$$

Donde:

$C_d$ = coeficiente de descarga

$C_w$ = coeficiente de vertedero según las unidades S.I 1.66 y U.S.C 3.0

$Y$ = altura de la lámina de agua frente a la estructura de entrada

$P_e$  = perímetro efectivo alrededor del sumidero de rejilla, definido como

$$P_e = (1 - C)P \quad (4.64)$$

Donde:

$C$  = factor de obstrucción, para rejillas generalmente  $C=0,5$

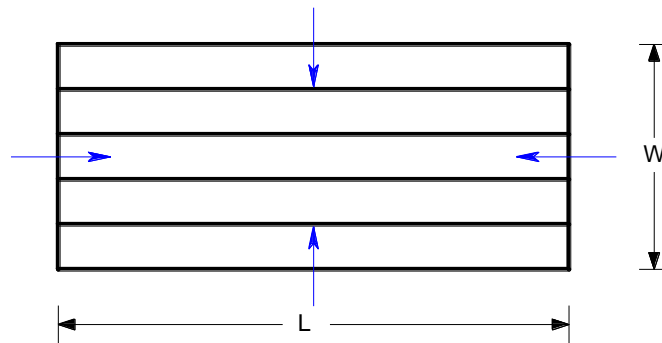
$P$  = perímetro mojado de la rejilla (m)

$$P = 2(L+W)$$

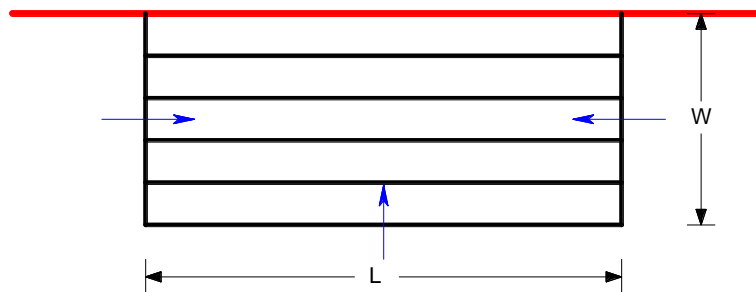
Sumidero en sitios sin cordón de andén

$$P = 2W + L$$

Sumidero en sitios con cordón de andén



**Figura 4.24 Intercepción del esparcimiento en una rejilla sin cordón de andén**



**Figura 4.25 Intercepción del esparcimiento en una rejilla con cordón de andén**

Cuando una rejilla sumergida opera como un orificio la capacidad está estimada por:

$$Q_i = C_o A_e \sqrt{2gY} = 0.67 A_e \sqrt{2g(Y + Y_s)} \quad (4.65)$$

Donde:

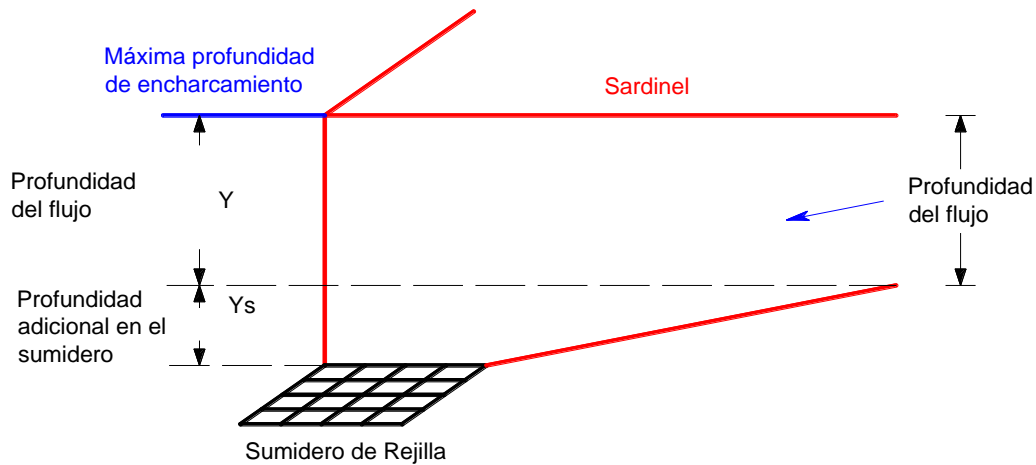
$C_o$  = es el coeficiente del orificio, para este caso 0.67

$A_g$  = área libre de la rejilla ( $m^2$ ), igual al área total de la rejilla menos el área cubierta por las barras de hierro

$$A_e = (1 - C)mWL \quad (4.66)$$

$m$  = relación del área de la apertura de la rejilla menos el área de las barras de acero y el área total de la apertura

Para aplicar la ecuación 4.65 para una rejilla en un punto bajo, la profundidad del flujo determina la hidráulica de la calle. La figura 4.26 muestra la profundidad adicional del estancamiento,  $Y_s$ , el cual se puede determinar con base en la condición de punto bajo. Por ejemplo, en la esquina de una calle, la máxima profundidad de estancamiento es la altura del cordón de andén (aproximadamente 0.20 m). Cuando el esparcimiento de diseño tiene una profundidad de 0.15 m la profundidad de encharcamiento adicional en la esquina de la calle es de 0.05 m. La Figura 4.26 muestra la profundidad de encharcamiento adicional que se observa en una tormenta.



**Figura 4.26 Determinación de la profundidad de encharcamiento en un sumidero**



**Figura 4.27 Profundidad adicional a la profundidad del esparcimiento en la esquina de una calle en una tormenta**

La transición entre el flujo de una rejilla que opera como vertedero y el de una que opera como orificio no está claramente establecida. Sin embargo, la presentación de la curva de descarga de una rejilla dada muestra que la curva de la rejilla que opera como vertedero intercepta a la curva de la rejilla que opera como orificio. El siguiente criterio se emplea para determinar la condición del flujo de un sumidero de rejilla en un punto bajo.

Para determinar la capacidad de intercepción para un sumidero de rejilla, de acuerdo con el tipo de flujo sobre la estructura y para una altura de lámina de agua, se deben calcular los caudales de las rejillas que operan como vertedero y como orificio, el menor determina el tipo de flujo en el sumidero.

$$Q_a = \min(Q_{i \text{ vertedero}}, Q_{i \text{ orificio}}) \quad (4.67)$$

$Q_a$  = caudal captado por el sumidero de rejilla en un punto bajo

- Ejemplo. Cálculo de la capacidad de un sumidero de rejilla en un punto bajo

Determinar la capacidad de intercepción de un sumidero de rejilla ubicado en un punto bajo de la vía, en una calle con las mismas características del ejemplo que se presentó para el cálculo de la capacidad de una calle en el numeral 4.2.6. La rejilla tiene las siguientes características:

a. Datos:

- ✓ Geometría del sumidero

*Tipo de rejilla (1-7)	=	3
Número de rejillas	=	1,0
Ancho de la rejilla W[m]	=	0,570
Longitud de la rejilla L[m]	=	1,0
Porcentaje de ocupación de las rejillas %	=	40,0

\*El tipo de rejilla se define de acuerdo con la tabla 4.3. Una rejilla tipo 3 es una rejilla de pletinas.

- ✓ Características del flujo sobre la cuneta. Calculado en el numeral 4.2.5

Profundidad de flujo Y [m] = 0,127

- ✓ Constantes

Factor de obstrucción de la rejilla = 0,50

b. Calcular la capacidad de intercepción del sumidero de rejilla

De acuerdo con la ecuación 4.67, para calcular el sumidero de rejilla se calculan cada uno de los caudales para una condición diferente del flujo en la rejilla y se selecciona el menor de los dos.

$$Q_a = \min(Q_{i \text{ vertedero}}, Q_{i \text{ orificio}})$$

- ✓ Capacidad del sumidero que opera como vertedero

Longitud efectiva

$$L_e = L * (1 - C) = 1 * (1 - 0,5) = 0,5m$$

Perímetro efectivo del sumidero

$$P_e = 2 * W + L_e = 2 * 0,57 + 0,5 = 1,64m$$

Capacidad de intercepción como vertedero

$$Q_{i \text{ vertedero}} = C_w P_e (Y + Y_s)^{1,5} = 1,66 * 1,64 * (0,127)^{1,5} = 0,1232m^3/s$$

- ✓ Capacidad del sumidero que opera como orificio

Área efectiva del sumidero

$$A_e = (1 - C)mWL = (1 - 0,5) * (1 - 0,4) * 0,57 * 1 = 0,1710m^2$$

Capacidad de intercepción como orificio

$$Q_{i \text{ orificio}} = C_o A_e \sqrt{2gY} = 0,67 * 0,171 \sqrt{2g(0,127)} = 0,1809m^3/s$$

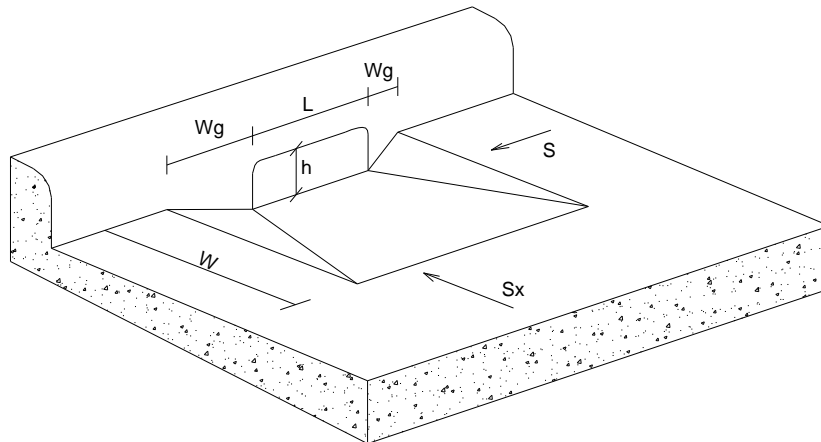
- ✓ Capacidad del sumidero de rejilla

$$Q_a = \min(Q_{i \text{ vertedero}}, Q_{i \text{ orificio}}) = (0,1232; 0,1809) = 0,1232 m^3/s$$

El sumidero de rejilla opera como vertedero.

#### 4.3.5. Sumideros laterales (8) (11) (27) (13) (26)

En un tramo de vía con pendiente, la capacidad de interceptación de un sumidero lateral depende en gran parte de la profundidad del flujo en el cordón de andén. Esta profundidad y, consecuentemente, la capacidad de interceptación y la eficiencia del sumidero lateral aumentan por el uso de una cuneta local deprimida o a continuación de ésta para incrementar la lámina de agua y el flujo adyacente al cordón de andén.



**Figura 4.28 Sumidero lateral. (8)**

En sumideros laterales los bordes y la losa superior de la ventana sitúan el flujo en la garganta de éste, reduciendo sustancialmente su capacidad de interceptación. Este fenómeno se puede evitar o reducir redondeando un poco los bordes, de tal manera que las líneas de corriente del flujo obtengan una curvatura adecuada al cambio de dirección y el flujo se pueda captar sin pérdidas significativas ni ahogamientos.

La condición hidráulica de un sumidero lateral localizado en un punto bajo de la vía equivale a un vertedero de cresta ancha, o bien, a la descarga a través de un orificio, lo cual depende de la altura de agua en el sardinel o cordón de andén. Los estudios de laboratorio desarrollados para determinar su comportamiento indican que para profundidades por encima de 1.4 veces la altura de la abertura el sumidero opera como un orificio; para profundidades de agua entre 1,4 veces la altura de la abertura y de la ventana del sumidero hay una transición del flujo entre vertedero y orificio; y para profundidades menores, la estructura opera como un vertedero. La profundidad efectiva en el cordón de andén se puede aumentar empleando continuamente una cuneta

deprimida e incrementando la pendiente transversal, de esta manera se disminuye el ancho del esparcimiento en la entrada. Por consiguiente, las condiciones del flujo en el sumidero se caracterizan por una derivación lateral parcial o total del caudal que proviene de la cuneta y, en términos generales, configuran un movimiento espacialmente variado.

Los sumideros laterales se utilizan como elementos de captación de la escorrentía en vías confinadas por cordones de andén. Estos elementos y la pendiente transversal de la calzada determinan una sección triangular para el flujo de aproximación al sumidero, la cual tiene poca profundidad y un ancho superficial condicionado por las normas que limitan el grado de interferencia con el tránsito de vehículos.

La mayor ventaja de este tipo de sumideros es su poca interferencia con el tránsito vehicular, pero son costosos y captan fácilmente sedimentos y desperdicios, razón por la cual su ubicación debe ser cuidadosa.

Los sumideros laterales son más eficientes en pendientes planas (o menores del 3%), en depresiones y con flujos que llevan cantidades significativas de sedimentos. Su capacidad de intercepción disminuye significativamente en las cunetas empinadas.

Como se mencionó, para sumideros ubicados en pendiente o en puntos bajos se recomienda suponer un área efectiva del 80 o 90% del área neta de la ventana; así mismo, para reducir costos, los sumideros de rejilla se deben diseñar de acuerdo con los tamaños estándar.

La capacidad de un sumidero lateral depende principalmente de los siguientes factores:

- ✓ Las condiciones de aproximación del flujo, expresadas por el caudal y la profundidad en el cordón de andén; a su vez, interrelacionados por la geometría de la vía, su pendiente longitudinal y su rugosidad.
- ✓ La longitud de la ventana.
- ✓ Para un mismo caudal y haciendo referencia a un sumidero de longitud, su capacidad de captación disminuye con la pendiente longitudinal de la vía, puesto



que la profundidad en el cordón de andén se hace menor y, por lo tanto, se reducen las cargas hidráulicas que inducen a alivio lateral.

- ✓ Especificados el caudal, la longitud del sumidero y la pendiente longitudinal aumenta la capacidad de los sumideros laterales con incrementos de la pendiente transversal de la vía.

En la fase del proyecto del sistema de drenaje se recomienda utilizar los resultados de las investigaciones experimentales, los cuales, por lo general, son más precisos que si se procede con un cálculo teórico, por las siguientes razones:

- a) La práctica ha demostrado que la eficiencia del sumidero lateral mejora sensiblemente si en su proyecto se especifica una depresión en un sector adyacente a la abertura. Esta alteración puede determinar una consideración de flujo, cuyas características no estén debidamente consideradas en las ecuaciones derivadas de la simplificación del régimen gradualmente variado, debido a la curvatura apreciable de las líneas de corrientes, a las pérdidas de energía localizadas y a la posibilidad de ahogamiento parcial o total de la ventana.
- b) El efecto de las ondas superficiales que se generan en las alteraciones de los contornos, si el régimen de aproximación es supercrítico.

#### 4.3.5.1. **Sumidero lateral sobre un tramo de vía con pendiente**

**(13) (26) (14)**

La longitud requerida de un sumidero lateral,  $L_t$ , para la intercepción completa de un flujo dado,  $Q_s$ , en la calle se calcula con la siguiente fórmula empírica:

$$L_t = K_c Q_s^{0.42} S_o^{0.3} \left( \frac{1}{n S_e} \right)^{0.6} \quad (4.68)$$

Donde:

$K_c$ = coeficiente de las unidades S.I 0.817 y U.S.C 0.6

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning

$S_e$  = pendiente equivalente, m/m

$S_e$ , para una depresión en la cuneta, resulta:

$$S_e = S_x + s_w E_w \quad (4.69)$$

$S_e$ , para una cuneta sin depresión:

$$S_e = S_x \quad (4.70)$$

$L_t$  = longitud del sumidero lateral (m), para interceptar el 100% del flujo de la cuneta

$S_o$  = pendiente longitudinal (m/m)

$Q_s$  = caudal en la calle (m<sup>3</sup>/s)

La capacidad de un sumidero lateral con una longitud  $L_c$ , menor que la longitud  $L_t$ , se puede aproximar por:

$$Q_a = Q_s \left[ 1 - \left( 1 - \frac{L_e}{L_t} \right)^{1.80} \right] \quad (4.71)$$

Donde:

$Q_a$  = capacidad de intercepción del sumidero lateral

$L_e$  = longitud efectiva del sumidero lateral, que se calcula como

$$L_e = L_c(1 - C)$$

Donde:

$L_c$  = longitud menor que la longitud  $L_t$ , es decir, la longitud estándar de un sumidero lateral

La ecuación 4.71, determina la capacidad ideal del sumidero.

#### - **Ejemplo. Cálculo de la capacidad de un sumidero lateral en pendiente**

Determinar la capacidad de intercepción de un sumidero lateral ubicado en pendiente, en una calle con las mismas características del ejemplo presentado para calcular la

capacidad de una calle en el numeral 4.2.6. El sumidero lateral tiene las siguientes características:

a. Datos:

✓ Calle

Pendiente longitudinal de la vía, $S_0$ [%]	=	3,00
Bombeo o pendiente transversal, $S_x$ [%]	=	2,00
Pendiente transversal en la cuneta, $S_w$ [%]	=	10,33
Coefficiente de rugosidad de Manning, n	=	0,016

✓ Capacidad de la vía

Flujo frontal transportado por ancho cuneta, $W Q_w$ [m <sup>3</sup> /s]	=	0,1343
Flujo lateral transportado por ancho vía, $Q_x$ [m <sup>3</sup> /s]	=	0,1331
Flujo transportado por la calle, $Q_{smc}$ [m <sup>3</sup> /s]	=	0,2674

✓ Constantes

Factor de obstrucción del sumidero lateral	=	0,1000
--	---	--------

✓ Geometría de la ventana

Longitud de la ventana L[m]	=	0,87
Número de ventanas		1,0

b. Calcular la capacidad de intercepción de un sumidero lateral en pendiente

Relación de flujo frontal,  $E_w$

$$E_w = \frac{Q_w}{Q_s} = \frac{0,1343}{0,2674} = 0,5024$$

Pendiente equivalente,  $S_e$

$$S_e = S_x + s_w E_w = 2 + 10,33 * 0,5024 = 7\%$$

La longitud total para captar el 100% de la capacidad de la calle,  $L_t$

$$L_t = K_c Q_s^{0.42} S_o^{0.3} \left( \frac{1}{n S_e} \right)^{0.6}$$

Con  $K_c = 0,817$

$$L_t = 0,817 * 0,2674^{0.42} * 0,03^{0.3} \left( \frac{1}{0,016 * 0,07} \right)^{0.6} = 9,51m$$

La longitud efectiva de la ventana es

$$L_e = L * (1 - C) = 0,87 * (1 - 0,1) = 0,783m$$

La capacidad del sumidero lateral en pendiente para una longitud efectiva  $L_e$  es

$$Q_a = Q_s \left[ 1 - \left( 1 - \frac{L_e}{L_t} \right)^{1.80} \right] = 0,2674 * \left[ 1 - \left( 1 - \frac{0,783}{9,51} \right)^{1.80} \right] = 0,0383m^3/s$$

#### 4.3.5.2. **Sumidero lateral sobre un punto bajo o una depresión**

**(13) (26) (14)**

Cuando un sumidero lateral opera como un vertedero, la capacidad está determinada por:

$$Q_i = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} P_e (Y_s + Y)^{1.5} = C_w L_e (Y_s + Y)^{1.5} \quad (4.72)$$

Donde:

$P_e$  = longitud efectiva alrededor de la depresión frente al sumidero de ventana

$$L_e = (1 - C)(L_c + kW_g) \quad (4.73)$$

Donde:

$C_w = 1.25$

$L_c$  = longitud del sumidero lateral (m)

$W_g$  = ancho lateral de la depresión (m) (ver figura 4.28)

$K = 1.8$  o  $2$  por los lados de la depresión

Cuando un sumidero lateral opera como un orificio, la capacidad se aproxima por:

$$Q_i = C_o A_e \sqrt{2g(Y_o)} \quad (4.74)$$

$$A_e = (1 - C) h L_c$$

Donde:

$$C_o = 0.63$$

$h$  = altura de la apertura del sumidero lateral

$$Y_o = (Y_s + Y) - \frac{h}{s} \text{sen}\theta \quad (4.75)$$

Donde:

$h$  = altura de la apertura del sumidero lateral (m)

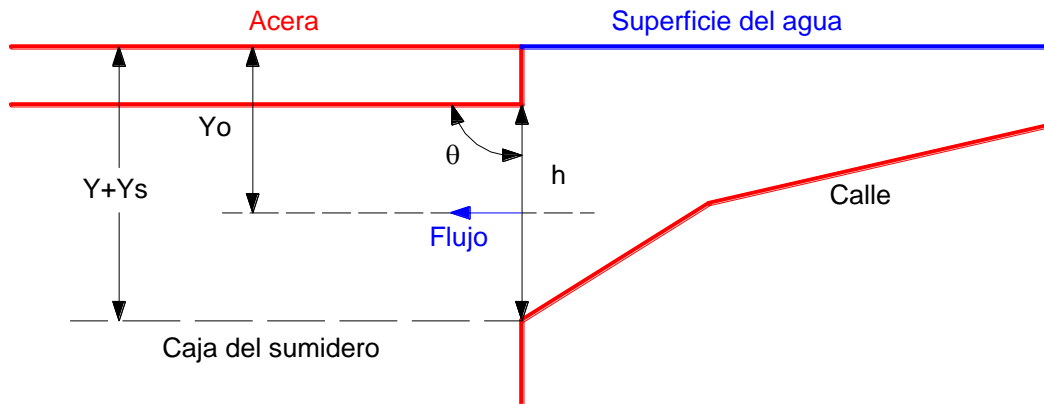
$\theta$  = ángulo de la garganta del sumidero, como se ilustra en la figura 4.29, igual a  $90^\circ$  cuando la garganta del sumidero lateral es vertical y a  $0^\circ$  cuando la garganta es horizontal, quedando entonces simplemente  $Y_o = (Y_s + Y)$ .

Para determinar la capacidad de intercepción del sumidero lateral, de acuerdo con el tipo de flujo sobre la estructura, se deben calcular los caudales operando como vertedero y como orificio, el menor determina el tipo de flujo en el sumidero.

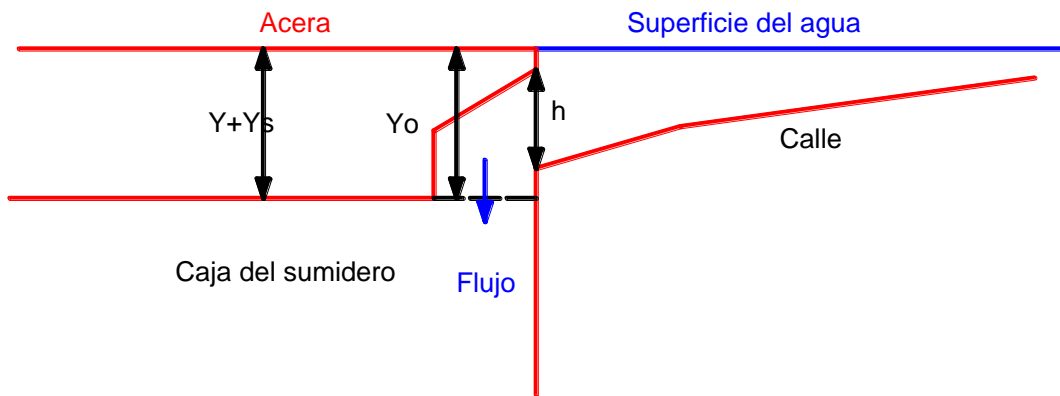
$$Q_a = \min(Q_{i \text{ vertedero}}, Q_{i \text{ orificio}}) \quad (4.76)$$

$Q_a$  = caudal captado por el sumidero lateral en un punto bajo

### GARGANTA HORIZONTAL- ÁREA DE ENTRADA VERTICAL



### GARGANTA VERTICAL- ÁREA DE ENTRADA HORIZONTAL



### GARGANTA INCLINADA

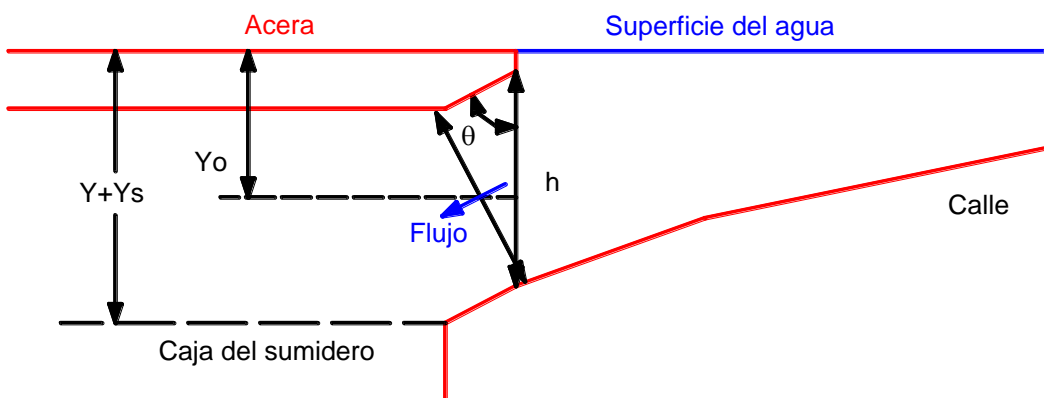


Figura 4.29 Configuración de la garganta de un sumidero lateral. (8)

- **Ejemplo. Cálculo de la capacidad de un sumidero lateral en punto bajo**

Determinar la capacidad de intercepción de un sumidero lateral ubicado un punto bajo de la vía, en una calle con las mismas características del ejemplo que se presentó para el cálculo de la capacidad de una calle en el numeral 4.2.6. El sumidero lateral tiene las siguientes características:

a. Datos:

✓ Geometría

Número de sumideros laterales	=	1,0
Longitud del sumidero lateral, $L_c$ [m]	=	0,87
Ancho lateral de la depresión, $W_g$ [m]	=	0,30
Lados de la depresión, $k=2,0$ o $1,8$	=	1,80
*Área de la entrada al sumidero lateral Tipo A	=	1
Altura de la apertura de entrada, $h$ [m]	=	0,15

\*El tipo de apertura depende del ángulo de la ventana del sumidero

Área de la apertura		
	Tipo A	$\theta^\circ$
1	Vertical	90
2	Horizontal	0
3	Inclinada	$\theta$

✓ Características del flujo

Profundidad del flujo,  $Y$  [m] = 0,12700

✓ Constantes

Factor de obstrucción de la ventana  $C$  = 0,1000

b. Cálculo de la capacidad del sumidero lateral en un punto bajo

Para evaluar la capacidad del sumidero lateral se calcula la capacidad del sumidero como si operara como vertedero lateral y como orificio. Para determinar su capacidad se selecciona el menor de los dos.

$$Q_a = \min(Q_{i \text{ vertedero}}, Q_{i \text{ orificio}})$$

- ✓ Capacidad del sumidero operando como vertedero

Longitud efectiva del sumidero:

$$L_e = (1 - C)(L_c + kW_g) = (1 - 0,1) * (0,87 + 1,8 * 0,3) = 1,269m$$

Caudal del sumidero como vertedero:

$$Q_i = C_w L_e (Y_s + Y)^{1.5} = 1,25 * 1,269 * (0,127)^{1.5} = 0,0718m^3/s$$

- ✓ Capacidad del sumidero operando como orificio

Área efectiva del sumidero,  $A_e$

$$A_e = (1 - C)hL_c = (1 - 0,1) * 0,15 * 0,87 = 0,1175m^2$$

Altura del orificio en función de la apertura,  $Y_o$

Para este caso, el tipo de apertura del sumidero es vertical,  $\theta = 90^\circ$ .

$$Y_o = (Y_s + Y) - \frac{h}{2} \text{sen}\theta = 0,127 - \frac{0,15}{2} \text{sen}90^\circ = 0,0520m$$

Capacidad de intercepción como orificio:

$$Q_i = C_o A_e \sqrt{2g(Y_o)} = 0,63 * 0,1566 * \sqrt{2g(0,027)} = 0,0747m^3/s$$



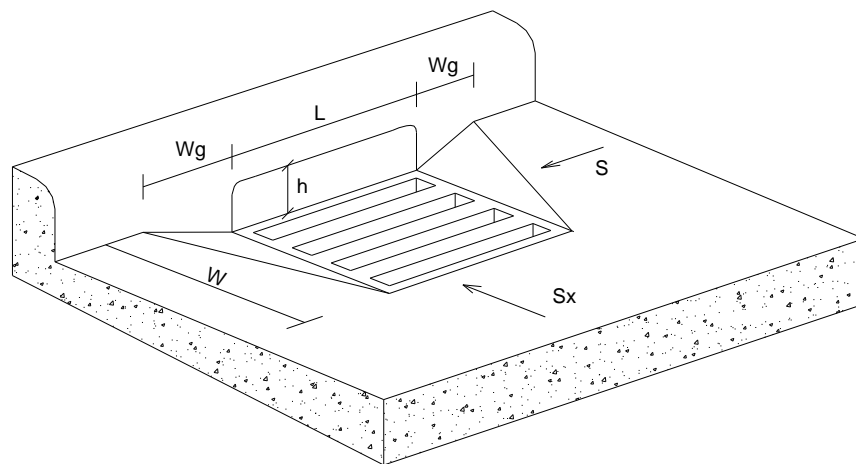
- ✓ Capacidad del sumidero lateral en un punto bajo

$$Q_a = \min(Q_{i \text{ vertedero}}, Q_{i \text{ orificio}}) = (0,0718; 0,0747) = 0,0718 \text{ m}^3/\text{s}$$

El sumidero de ventana opera como vertedero.

#### 4.3.6. Sumideros combinados (8) (11) (13)

Los sumideros combinados son la unión de uno de rejilla y uno de ventana. Proveen una alta capacidad de entrada, pues combinan las ventajas de ambos tipos.



**Figura 4.30 Sumidero combinado. (8)**

Un sumidero combinado está compuesto por una ventana lateral en el cordón de andén enfrente a un sumidero de rejilla, con una capacidad de interceptación igual a la suma de los dos sumideros. O puede estar conformado por una ventana lateral en el cordón de andén, situada aguas arriba de un sumidero de rejilla, con una capacidad igual a la de un sumidero lateral aguas arriba más la de la rejilla, teniendo en cuenta la reducción del ancho del esparcimiento y la profundidad del flujo sobre la rejilla, como consecuencia de la interceptación de la ventana.

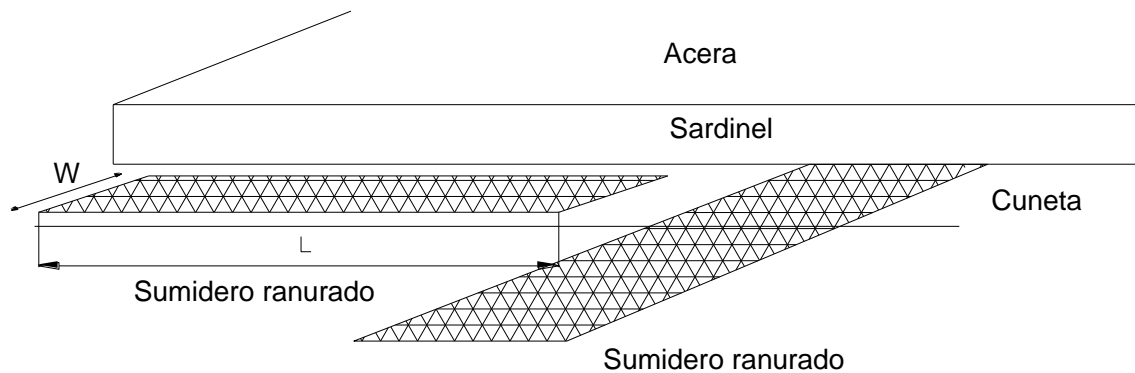
Este tipo de sumideros tiene como ventaja la interceptación de escombros y basuras, actuando como “barrendero” para impedir el paso de desechos, que podrían obstruir la rejilla y desviar el agua hacia otro sumidero. La posición más eficiente para este tipo de sumideros es en una curva vertical cóncava o en un punto bajo, con ventanas a ambos lados de la rejilla.

Algunas recomendaciones para el uso de este tipo de sumideros es emplearlos en aquellos casos donde en principio son preferibles los sumideros de ventana, pero cuya eficiencia de captación sea menos del 75%. Utilizarlos preferiblemente con una sola reja y suponer un área efectiva del 67% del área neta total de la reja y la ventana (11).

#### **4.3.7. Sumideros ranurados (8) (13) (27) (28)**

Estos sumideros son una tira horizontal de rejilla localizada en la parte superior de una zanja, la parte superior de la garganta se construye a ras con la superficie del pavimento o la cuneta. Pueden ser perpendiculares o paralelos al bordillo de la acera, teniendo en cuenta el esparcimiento del agua, la interferencia del tráfico y otras consideraciones de mantenimiento, como se muestra en 4.31. Para el caso de pendientes muy empinadas, donde la escorrentía de una tormenta dada es ampliamente expandida, un sumidero ranurado puede ser una estructura de entrada eficiente. Por ejemplo, estos sumideros se localizan a menudo a través de una rampa en una carretera o en la entrada de un parqueadero subterráneo.

Los sumideros ranurados funcionan de la misma forma que los sumideros laterales. Su capacidad de interceptación depende de la profundidad del flujo y de la longitud de la entrada. La experiencia con la capacidad de manipulación de escombros de este tipo de sumideros no es muy amplia. La deposición de escombros en la tubería es un problema muy común; sin embargo, la configuración de los sumideros ranurados permite su limpieza con un chorro de agua a fuerte presión.



**Figura 4.31 Sumidero ranurado. (8)**

Se pueden utilizar en áreas donde se desee interceptar el flujo en hoja antes de los cruces, sobre una sección de la vía. Su principal ventaja es la capacidad de interceptar el flujo en lámina en una amplia sección de la vía.

Cuando se sitúan en ángulo recto al flujo, la ranura actúa como una pequeña rejilla, asumiendo una "velocidad de salpicadura" o velocidad sobre la ranura de 0.3 m/s y sin flujo lateral. Para calcular su capacidad se pueden emplear las ecuaciones de eficiencia de entradas de rejillas.

Ubicados en forma paralela al flujo, la interceptación en la cuneta de los sumideros ranurados es similar a la de los laterales. Según datos de la Administración Federal de Carreteras sobre pruebas realizadas en sumideros ranurados, con un ancho mayor o igual a 45 mm, para calcular el ancho requerido para la interceptación total se pueden utilizar las ecuaciones de los sumideros laterales.

Es importante señalar que para incrementar la capacidad de interceptación es menos costoso adicionar ancho a un sumidero ranurado que adicionar longitud a un sumidero lateral.

Los sumideros ranurados ubicados en locaciones deprimidas operan como vertederos, dependiendo del ancho de la ranura para profundidades por encima de 0.06 m. Para

profundidades mayores a 0.12 m se desarrollan como orificios. Para valores entre estas profundidades, el flujo se encuentra en una etapa de transición.

Los sumideros ranurados tienen las siguientes ventajas:

- Son adaptables a las intersecciones viales con características urbanas como calzadas, cruces de calles y aceras.
- Tienen capacidad para soportar el tráfico de vehículos, bicicletas, sillas de ruedas y algo de tráfico peatonal.
- No es necesaria la depresión para su eficiencia hidráulica.
- La interceptación de flujo es posible a un costo relativamente bajo.
- Su construcción es relativamente simple y rápida.
- Los tratamientos de la superficie se pueden acomodar sin ningún efecto sobre los sumideros ranurados originales.
- Son estéticamente agradables.

Entre las desventajas tenemos:

- Tienen una alta tendencia a recoger escombros en los puntos bajos.
- Para un mantenimiento eficaz requieren, por lo general, de una alcantarilla adyacente o un sumidero lateral.

#### 4.3.7.1. ***Sumideros ranurados operando como un vertedero (8)***

**(13)**

La capacidad de un sumidero ranurado operando como vertedero se puede calcular como:

$$Q_i = 1.66L(Y_s + Y)^{1.5} \quad (4.77)$$

Donde:

L = longitud de la ranura, (m)

#### 4.3.7.2. **Sumideros ranurados operando como un orificio (8) (13)**

La capacidad de un sumidero ranurado operando como un orificio se puede calcular así:

$$Q_i = 0.8LW \sqrt{2g(Y_s + Y)} \quad (4.78)$$

Donde:

W = ancho de la ranura, (m)

L = longitud de la ranura, (m)

## **5. CAPTACIONES**

### **5.1. Captaciones Convencionales y no Convencionales**

#### **5.1.1. Captaciones convencionales**

En un sistema de drenaje convencional la captación de la escorrentía superficial se realiza a través de las vías o cunetas. Éstas transportan el agua lluvia hasta las estructuras de captación denominadas sumideros. Las cunetas y los sumideros conforman las estructuras convencionales necesarias para la captación de la escorrentía superficial.

#### **5.1.2. Captaciones no convencionales**

Son estructuras alternativas en el sistema de drenaje urbano para la captación de la escorrentía superficial guiadas por el drenaje sostenible. Para determinar las estructuras de captación no convencionales, es necesario conocer las estructuras que utilizan los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para el manejo adecuado de la escorrentía y determinar cuáles de estas cumplen la función de captación de la escorrentía superficial. A continuación se presenta la clasificación de las estructuras SUDS, de acuerdo con la bibliografía consultada.

### **5.2. Clasificación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)**

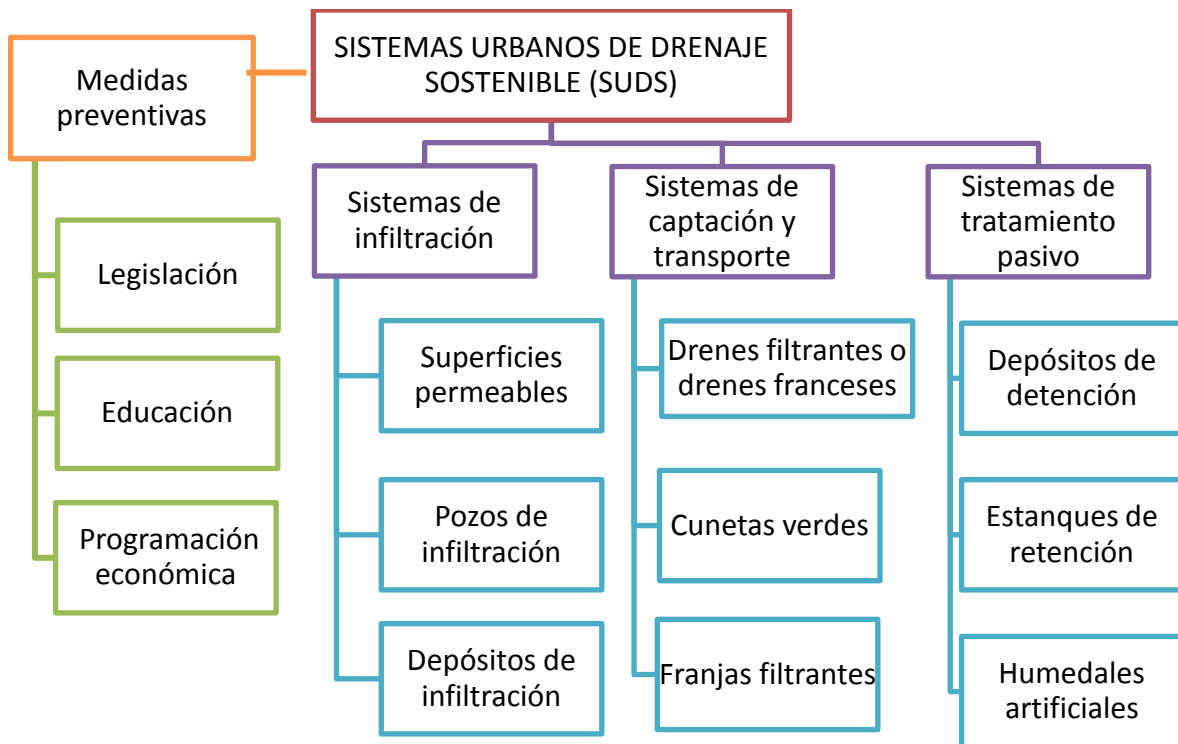
Debido a que los sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS) son prácticas relativamente nuevas con múltiples funciones, no se ha homogenizado ninguna clasificación. A continuación se presentan diferentes clasificaciones para los SUDS, elaboradas por diversos grupos de trabajo, manuales y entidades.

- a. El Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Santander de la Universidad de Cantabria (GITECO) propone la siguiente clasificación para los SUDS.

Esta clasificación representa la función que cumple cada sistema en el proceso de manejo del agua lluvia en el casco urbano, sobre la base de unas medidas preventivas donde se plantea el aspecto legislativo, educativo y económico, como se muestra en la tabla 5.1 y la figura 5.1.

**Tabla 5.1 Clasificación de los SUDS (Universidad de Cantabria) (8) (9)**

Categoría		Técnica de drenaje sostenible
<b>Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)</b>	Medidas preventivas	Legislación
		Educación
		Programación económica
	Sistemas de infiltración	Superficies permeables
		Pozos de infiltración y zanjas de infiltración
		Depósitos de infiltración
	Sistemas de captación y transporte	Drenes filtrantes o drenes franceses
		Cunetas verdes
		Franjas filtrantes
	Sistemas de tratamiento pasivo	Depósitos de detención
		Estanques de retención
		Humedales artificiales

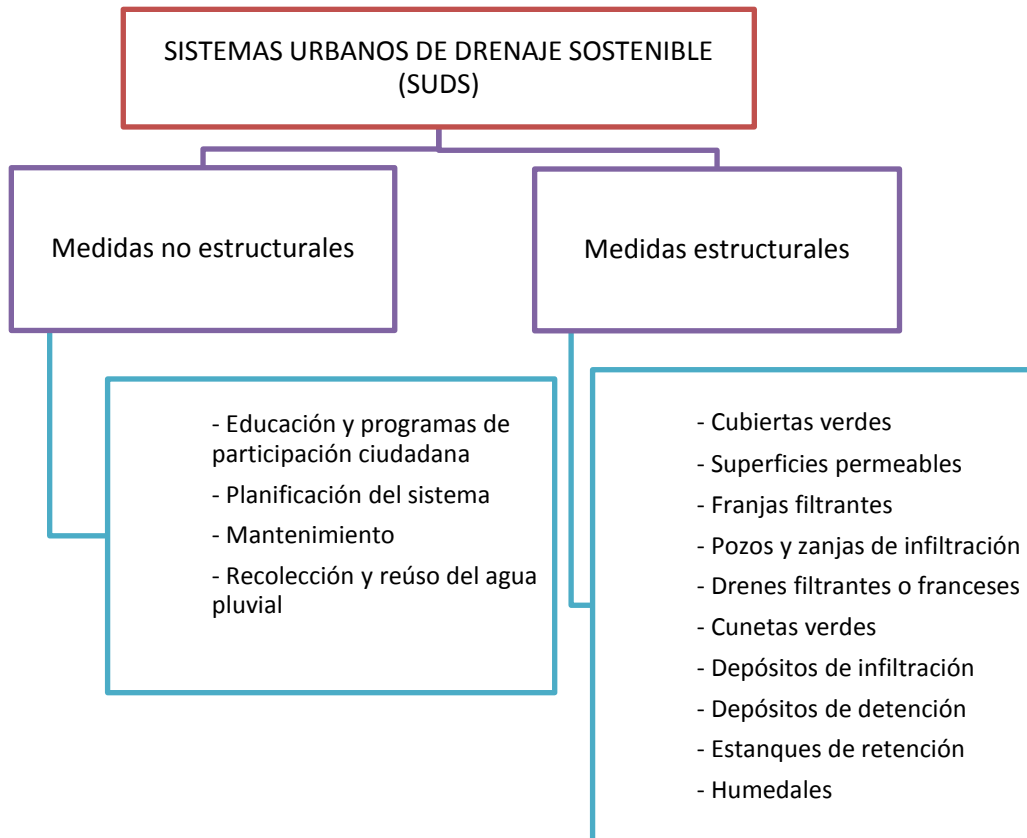


**Figura 5.1 Clasificación de los SUDS (Universidad de Cantabria) (8) (9)**

De acuerdo con la tabla 5.1 y la figura 5.1 los SUDS se clasifican en: a) medidas preventivas, las cuales proponen una planeación en los organismos de control para prevenir problemas asociados a la escorrentía superficial a través de normatividad, educación y programación; b) sistemas de infiltración, que por medio de la infiltración dan un tratamiento a la escorrentía urbana; c) sistemas de captación y transporte, cuyo objetivo principal es recoger y conducir lentamente la escorrentía superficial, y c) sistemas de tratamiento pasivo, ubicados al final del sistema de drenaje antes de la descarga al afluente. Estos sistemas proporcionan almacenamiento de las aguas lluvias por un periodo de tiempo para controlar los picos de escorrentía y, a la vez, tratarlas.

- b. El Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia presenta una clasificación de los SUDS a partir de lo que denominan medidas no estructurales y medidas estructurales, como se presentan en la figura 5.2 (7).





**Figura 5.2 Clasificación de los SUDS (Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia) (7).**

Las medidas no estructurales son aquellas donde en el drenaje de aguas lluvias intervienen la educación, la planificación, el mantenimiento, la regulación, el control y la participación ciudadana.

Las medidas estructurales son las que gestionan la escorrentía mediante algún elemento constructivo, pero cuyas técnicas no se subclasifican bajo ningún otro criterio.

- ✓ Medidas no estructurales

Entre las medidas no estructurales más difundidas cabe citar las siguientes:

- Educar a través de programas de participación ciudadana.

- Planificar y diseñar, minimizando las superficies impermeables para reducir la escorrentía.
- Limpiar con frecuencia las superficies impermeables para reducir la acumulación de contaminantes.
- Controlar la aplicación de herbicidas y fungicidas en parques y jardines.
- Controlar las zonas en construcción para evitar el arrastre de sedimentos.
- Asegurar la existencia de procedimientos de actuación y equipamiento adecuados para tratar rápidamente episodios de vertidos accidentales y con técnicas secas, en lugar de limpiar con agua.
- Limitar el riesgo de que la escorrentía entre en contacto con contaminantes.
- Controlar las conexiones ilegales al sistema de drenaje.
- Recoger y reutilizar las aguas pluviales.

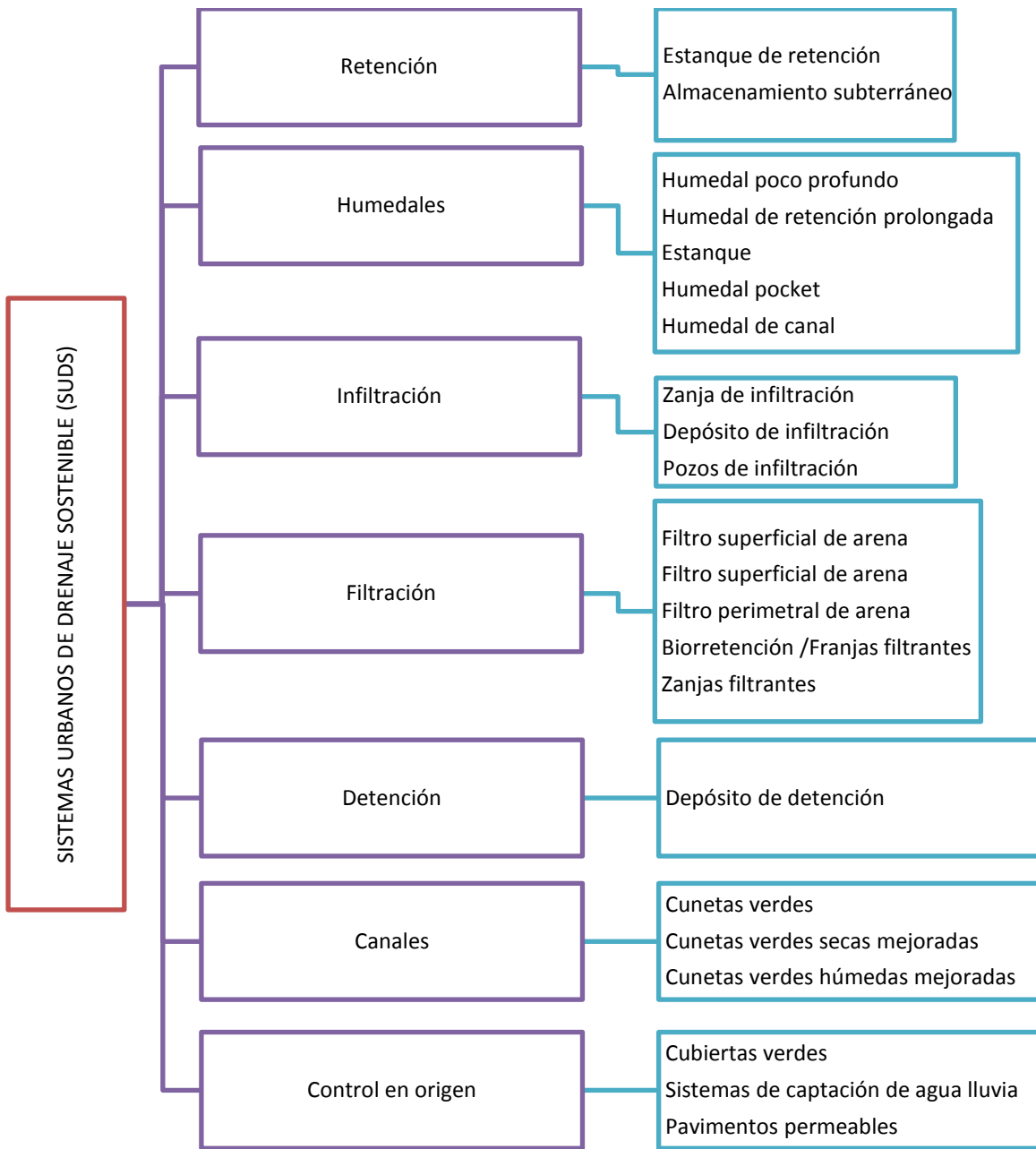
✓ Medidas estructurales

- Cubiertas verdes (Green-roofs).
- Superficies permeables (Porous / Permeable paving).
- Franjas filtrantes (Filter strips).
- Pozos y zanjas de infiltración (Soakaways and infiltration trenches).
- Drenes filtrantes o franceses (Filter drains).
- Cunetas verdes (swales).
- Depósitos de infiltración (Infiltration basins).
- Depósitos de detención (Detention basins), enterrados y en superficie.
- Estanques de retención (Retention ponds).
- Humedales (Wetlands).

c. En el Reino Unido, The Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), en su manual “The SUDS manual” (2), presenta una clasificación de acuerdo con el tratamiento de la escorrentía en el drenaje urbano. Esta clasificación se presenta en la tabla 5.2 y la figura 5.3.

**Tabla 5.2 Clasificación de los SUDS en el Reino Unido (CIRIA) (2)**

<b>Grupo SUDS</b>	<b>Técnica</b>
Retención (Retention)	Estanque de retención (Ponds retention)
	Almacenamiento subterráneo
Humedales (Wetlands)	Humedal poco profundo
	Humedal de retención prolongada
	Estanque/Humedal
	Humedal pocket
	Humedal de grava sumergido
	Humedal de canal
Infiltración (Infiltration)	Zanja de infiltración (Infiltration tenches)
	Depósito de infiltración (Infiltration basins)
	Pozos de infiltración
Filtración (filtration)	Filtro superficial de arena (Sand filters)
	Filtro subterráneo de arena
	Filtro perimetral de arena
	Biorretención (Bioretention)/Franjas filtrantes (Filter strips)
	Zanjas filtrantes (Filter trenches)
Detención (Detention)	Depósito de detención (Detention basins)
Canales (Open channels)	Cunetas verdes (Swales)
	Cunetas verdes secas mejoradas
	Cunetas verdes húmedas mejoradas
Control en origen (Source control)	Cubiertas verdes
	Sistemas de captación de agua lluvia
	Pavimentos permeables (Pervious pavements)



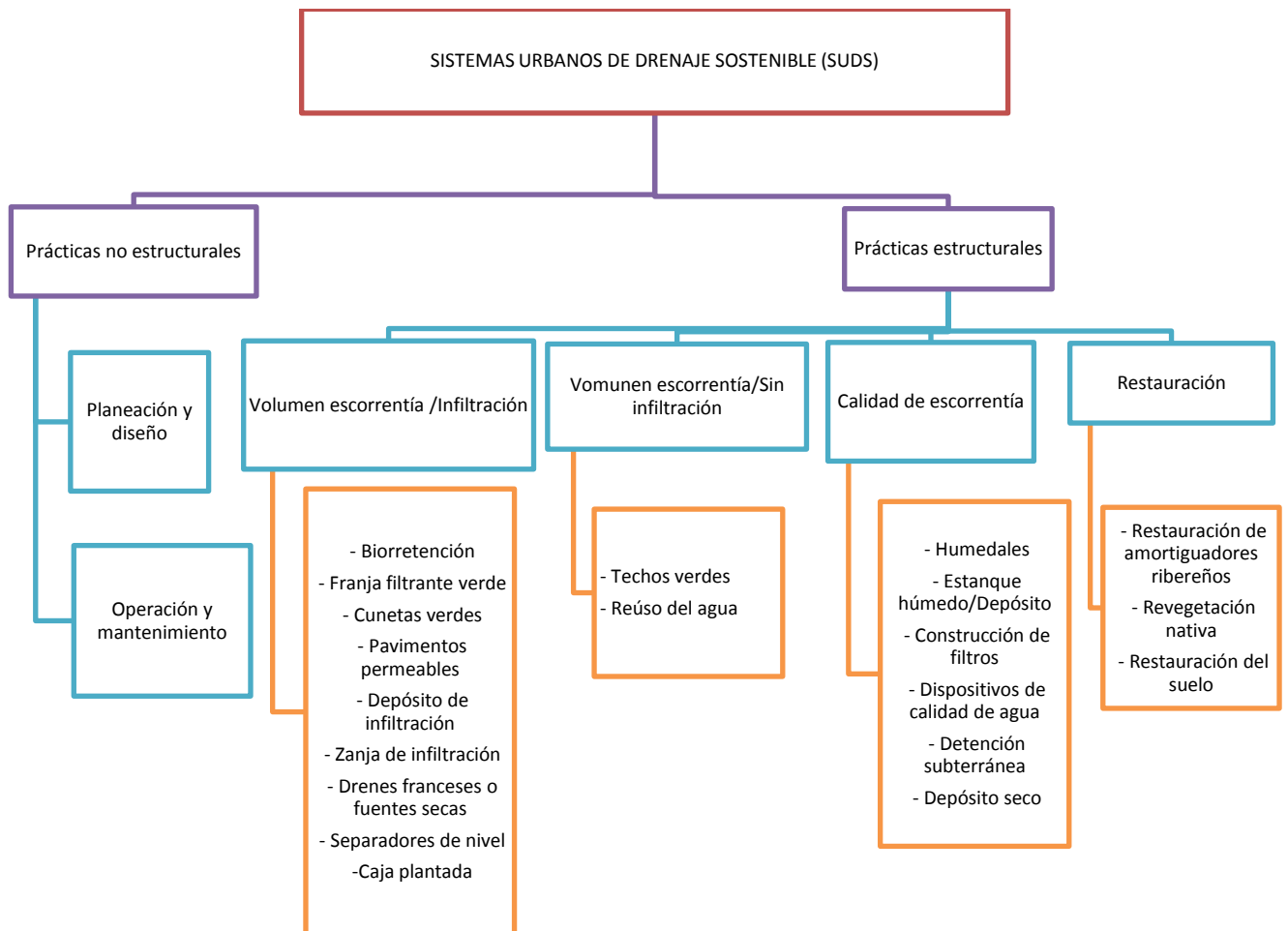
**Figura 5.3 Clasificación de los SUDS en el Reino Unido (CIRIA) (2)**

d. El manual de desarrollo de bajo impacto, Low Impact Development Manual for Michigan (10), presenta la siguiente clasificación de los SUDS.

En esta referencia las prácticas SUDS se clasifican de acuerdo con su función dentro del manejo del drenaje urbano.

- ✓ Prácticas no estructurales:
  - Reducir al mínimo la compactación del suelo.
  - Minimizar el área total perturbada.
  - Proteger las corrientes de flujo natural,
  - Proteger las zonas de amortiguación ribereñas.
  - Proteger las zonas sensibles.
  - Reducir las superficies impermeables.
- ✓ Prácticas estructurales

En la tabla 5.3 y la figura 5.4 se presenta la clasificación de las prácticas SUDS, de acuerdo con el manual para Michigan.



**Figura 5.4 Clasificación de los SUDS (Michigan) (10)**

**Tabla 5.3 Clasificación de los SUDS (Michigan) (10)**

	<b>PRÁCTICAS ESTRUCTURALES</b>
Volumen escorrentía /Infiltración	Biorretención (Bioretention)
	Franja filtrante verde (Vegetated filter strip)
	Cunetas verdes (Swales)
	Pavimentos permeables (Pervious pavement)
	Depósito de infiltración (Infiltration basin)
	Zanja de infiltración (Infiltration trench)
	Drenes franceses o fuentes secas (Dry well)
	Separadores de nivel (Level spreaders)
	Berging (Berning)
	Caja plantada (Planter box)
Volumen escorrentía /Sin infiltración	Techos verdes (Vegetated roof)
	Reúso del agua (Capture reuse)
Calidad escorrentía	Humedales (Wetland)
	Estanque Húmedo/Depósito de retención
	Construcción de filtros
	Dispositivos de calidad de agua
	Detención subterráneo
	Depósito seco
Restauración	Restauración de amortiguadores de agua local o ribereños
	Revegetación nativa
	Restauración del suelo

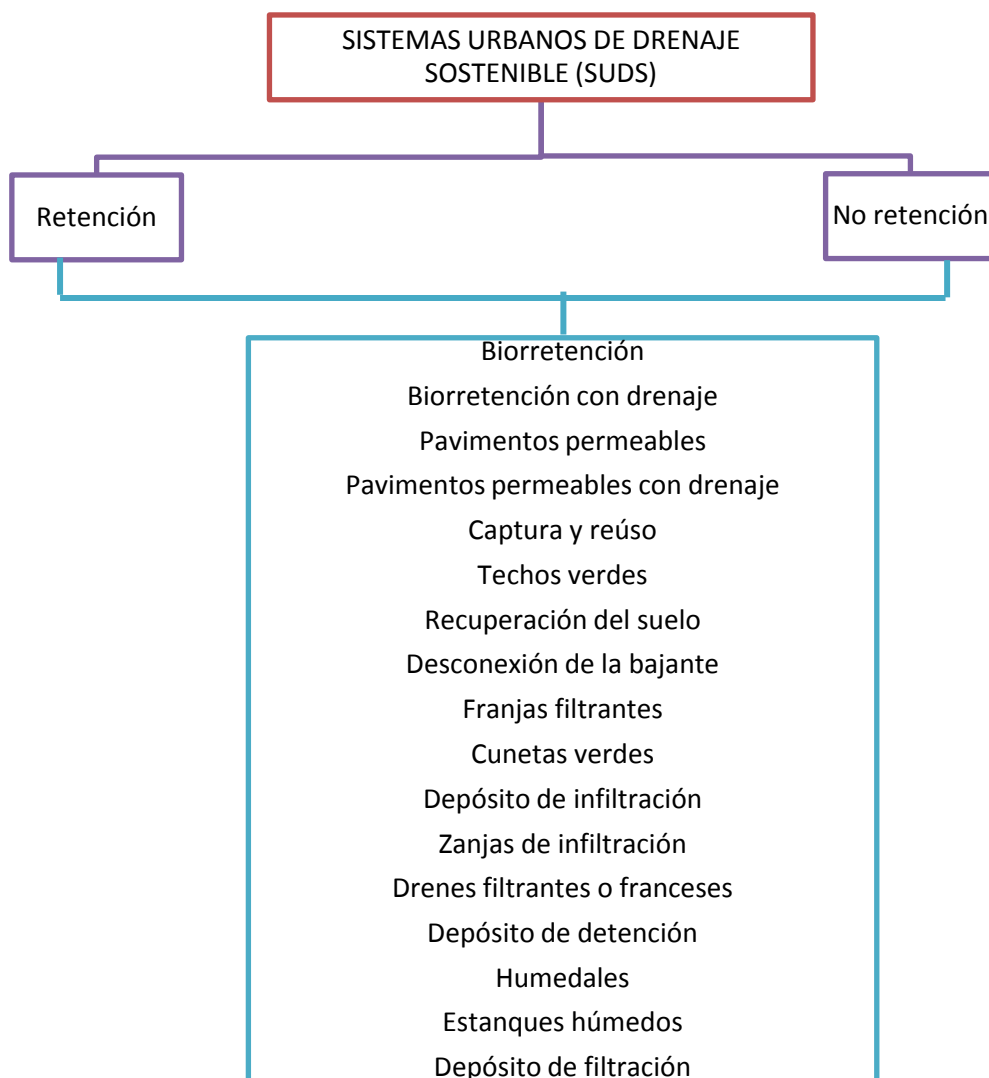
- e. De acuerdo con la guía técnica preparada por The Southern California Stormwater Monitoring Coalition (11), las prácticas SUDS se pueden dividir en dos grandes grupos, de acuerdo con su función. Pueden ser prácticas de Retención o de No-Retención.

Las prácticas SUDS de retención están compuestas por técnicas que finalizan el manejo de la escorrentía de aguas lluvias en el sitio de origen, ya sea a través de la infiltración, la

evapotranspiración, el reúso o la captura del agua lluvia. Las prácticas SUDS de no retención son técnicas que continúan con el proceso de captura, transporte y disposición del agua lluvia fuera del sitio de origen de la escorrentía. En función de las limitaciones del sitio donde se controla la escorrentía de aguas lluvias, muchas prácticas SUDS se pueden configurar para que funcionen como cualquiera de los dos tipos. Aunque inicialmente se presenta una clasificación en medidas de retención y de no retención, al hacer referencia a que todas las BMP pueden funcionar como cualquiera de las dos medidas, se presentan todas las técnicas indistintamente en una sola lista. (Ver tabla 5.4 y figura 5.5)

**Tabla 5.4 Clasificación de los SUDS (California) (11)**

<b>Prácticas SUDS</b>
Biorretención
Biorretención con drenaje
Pavimento permeable
Pavimento permeable con drenaje
Captura y reúso
Techos verdes
Recuperación del suelo
Desconexión de la bajante
Franjas filtrantes
Cunetas verdes
Depósito de infiltración (retención)
Zanjas de infiltración
Drenes filtrantes o franceses (Dry well)
Depósito de detención (Dry ponds)
Humedales
Estanques húmedos
Depósito de filtración
Dispositivos de propiedad



**Figura 5.5 Clasificación de los SUDS (California) (11)**

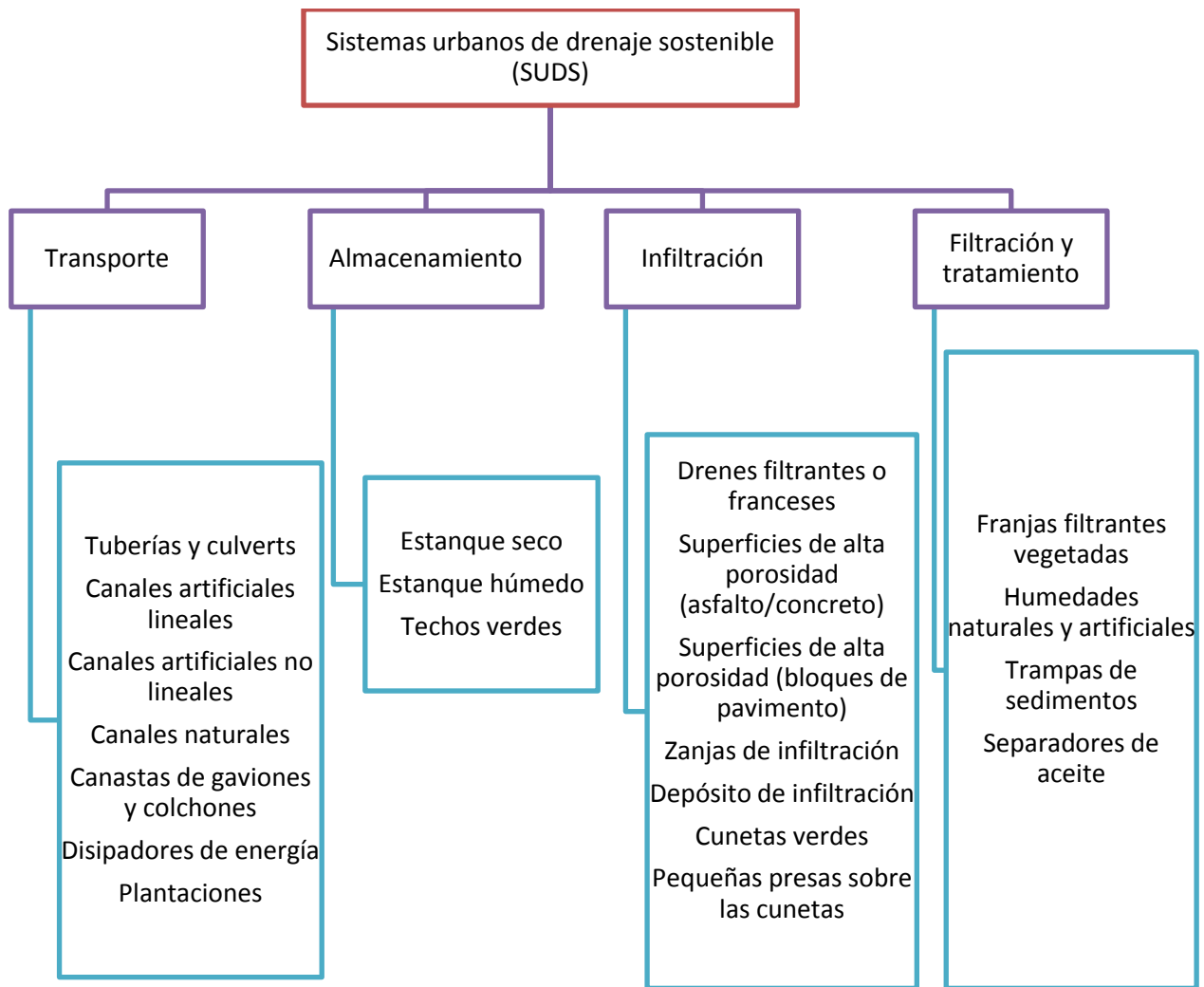
- f. La guía de Suráfrica, “Stormwater Management Planning and Desing Guidelines for New Developments City of Cape Town. South Africa” (12), presenta la siguiente clasificación de las técnicas para el manejo de la escorrentía, de acuerdo con la función que cumplen dentro del manejo urbano de drenaje de aguas lluvias.
- ✓ **Transporte.** Uso de canales naturales o artificiales, humedales naturales o artificiales, tuberías y culverts para el transporte de la escorrentía, así como la prevención de la erosión.



- ✓ **Estanque-almacenamiento.** Es una forma de control de las aguas lluvias. Este término se refiere a los métodos de infiltración de la escorrentía en el suelo o la retención por un tiempo de las crecientes, que reducen la escorrentía pico, contribuyen a extender la base del hidrograma, mejoran la calidad del agua y crean hábitats naturales.
- ✓ **Infiltración.** Reduce el volumen de la escorrentía y contribuye a la recarga de acuíferos.
- ✓ **Filtración y tratamiento.**

**Tabla 5.5 Clasificación de los SUDS (Suráfrica) (12)**

<b>Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)</b>	
<b>Transporte</b>	Tuberías y culverts
	Canales artificiales lineales
	Canales artificiales no lineales
	Canales naturales
	Canastas de gaviones y colchones
	Disipadores de energía
	Plantaciones
<b>Almacenamiento</b>	Estanque seco
	Estanque húmedo
	Techos verdes
<b>Infiltración</b>	Drenes filtrantes o franceses
	Superficies de alta porosidad (asfalto/concreto)
	Superficies de alta porosidad (bloques de pavimento)
	Zanjas de infiltración
	Depósito de infiltración
	Cunetas verdes
	Pequeñas presas sobre las cunetas
<b>Filtración y tratamiento</b>	Franjas filtrantes vegetadas
	Humedales naturales y artificiales
	Trampas de sedimentos
	Separador de aceite

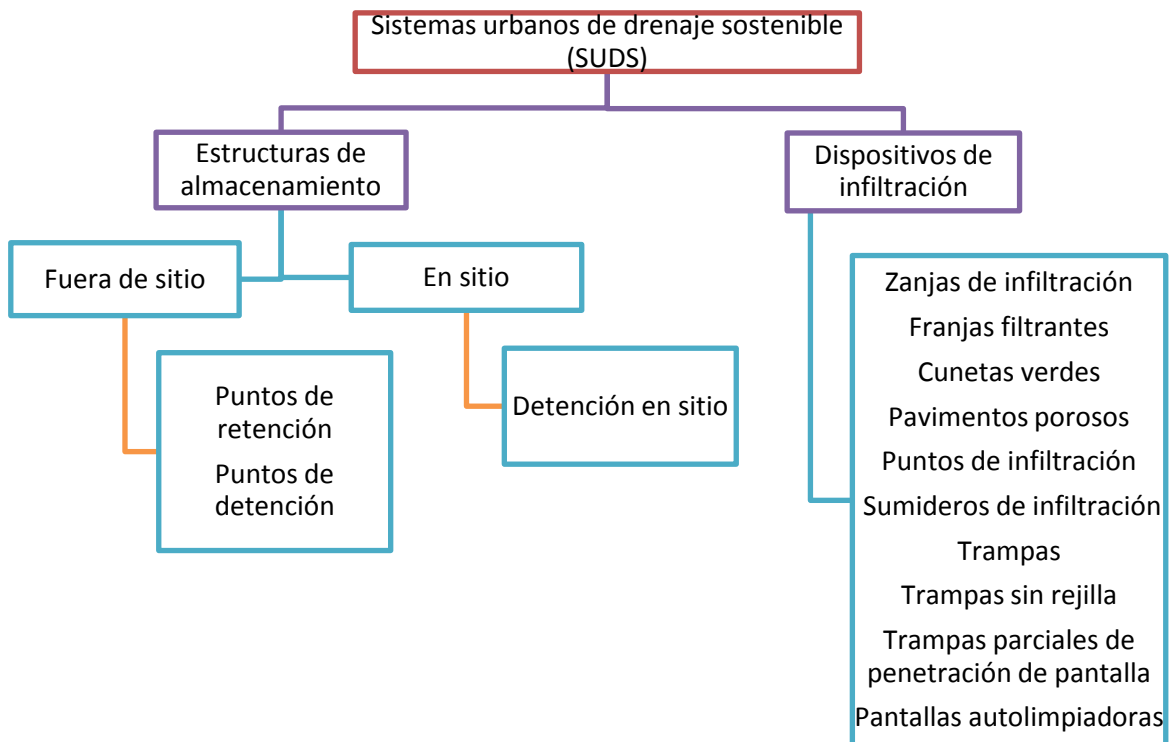


**Figura 5.6 Clasificación de los SUDS (Suráfrica) (12)**

g. En un documento realizado conjuntamente por São Paulo (Brasil) y la Unicef, Urban Drainage in Humid Tropics (13), los SUDS se denominan técnicas de detención y flujo de retraso en el drenaje urbano. Esta clasificación se hace de acuerdo con la función de cada SUDS en el manejo del drenaje urbano, como se presenta a continuación:

- ✓ Estructuras de almacenamiento fuera de sitio (Off-site storage structures)
  - Puntos de detención (Detention ponds)
  - Puntos de retención (Retention ponds)
- ✓ Estructuras de almacenamiento en sitio (On site storage structures)

- Detención en sitio
- ✓ Tipos de dispositivos de infiltración (Infiltration type devices)
  - Zanjas de infiltración (Infiltration trenches)
  - Franjas filtrantes (Grass filter strips)
  - Cunetas verdes (Grassed swales)
  - Pavimentos porosos (Pervious pavements)
  - Puntos de infiltración (Infiltration ponds)
  - Sumideros de infiltración
  - Trampas (Litter traps)
  - Trampas sin rejilla (Screenless traps)
  - Trampas parciales de penetración de pantalla (Partial penetration screen traps)
  - Pantallas autolimpiadoras (Self-cleaning screens)



**Figura 5.7 Clasificación de los SUDS (São Paulo y Unicef). (13)**

### **5.3. Clasificación Propuesta para los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS)**

De acuerdo con la recopilación bibliográfica se propone la siguiente clasificación, en la cual las estructuras se presentan de acuerdo con la función que cumplen en el manejo de la escorrentía del drenaje urbano. Esta clasificación facilita la selección adecuada de las estructuras SUDS para cada caso de drenaje urbano en particular.

Muchas de las referencias consultadas presentan la clasificación de las estructuras SUDS de acuerdo con una clasificación general establecida. Por esta razón, las estructuras SUDS se presentan teniendo en cuenta los aspectos legislativos, educativos y económicos.

Aunque para el manejo integral de un sistema de drenaje deben estar presentes estos referentes, esta clasificación se concentra únicamente en la función principal de cada estructura y en el rol que cumple dentro del sistema de drenaje de aguas lluvias. La selección facilita su estudio e identifica su función básica en el manejo de la escorrentía superficial.

De esta manera se propone dividir las estructuras SUDS como se presenta a continuación:

1. Estructuras de captación y transporte. Son estructuras que cumplen la función de captar y transportar la escorrentía superficial.
  - a. Para edificaciones. Estructuras utilizadas en las instalaciones internas de las edificaciones o viviendas.
  - b. Para zonas públicas.
2. Estructuras de almacenamiento. Son aquellas que tienen por finalidad el almacenamiento temporal de la escorrentía.

En la tabla 5.6 y la figura 5.8 se presenta la clasificación propuesta para las estructuras SUDS.

Tabla 5.6 Clasificación de los SUDS propuesta por este trabajo

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE (SUDS)			
ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN Y TRANSPORTE	En edificaciones	<p>Cubiertas verdes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Extensivas</li> <li>b. Semi-intensivas</li> <li>c. Intensivas</li> </ul>	
		Sistemas de reúso de agua	
	En zonas urbanas	Superficies permeables	
		Pozos de infiltración	
		Zanjas	Infiltración
			Filtración
			Biofiltros
		Cunetas verdes	
		Franjas filtrantes	
	Redes troncales		
ALMACENAMIENTO	Depósitos de retención		
	Depósitos de detención		
	Humedales		

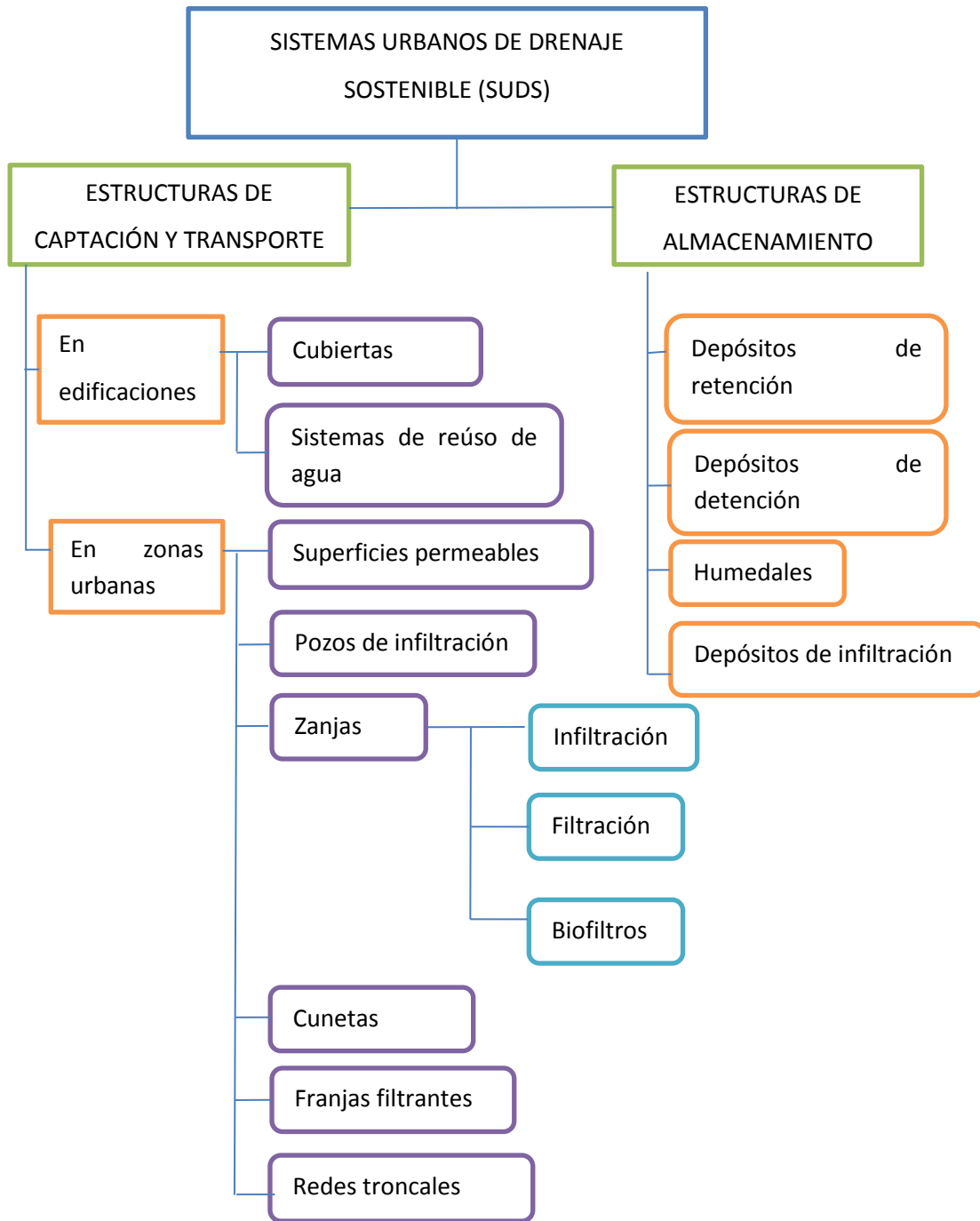


Figura 5.8 Diagrama de clasificación de los SUDS propuesta por este trabajo

### 5.3.1. Descripción general y uso de las estructuras SUDS

De acuerdo con la clasificación propuesta por el autor a partir del trabajo de investigación, a continuación se presenta una descripción general de las estructuras SUDS, con el fin de seleccionar algunas de ellas para su estudio y presentación detallada (35)

#### a. Estructuras de captación y transporte

##### En edificaciones

##### ✓ Cubiertas verdes

Son techos o terrazas de cualquier tipo con cubierta vegetal. En el manejo de la escorrentía urbana, estas estructuras tienen la capacidad de almacenar un porcentaje del agua lluvia, de acuerdo con su capacidad de retención, para descargarla luego del evento de escorrentía o evaporarla.

“Una cubierta verde puede reducir hasta el 60% de la escorrentía y hasta un 85% de la evacuación de aguas durante las dos primeras horas de lluvia intensa. Según la norma alemana DIN 1986, el coeficiente de escorrentía para las cubiertas verdes con un mínimo de 10 cm de espesor es de 0,3 (35).

Las cubiertas verdes tienen beneficios adicionales, reemplazando las cubiertas de concreto o material impermeable por vegetación se incrementan los procesos naturales de enfriamiento como la fotosíntesis y la evapotranspiración, lo cual reduce el aumento de temperatura en la ciudad. Además, retienen dióxido de carbono y otros contaminantes, actúan como capa aislante térmica en el edificio y mejoran la estética del lugar (visual, sonidos, aromas) (7).

La clase de cubierta que se desee instalar depende del tipo de edificación y del uso que se le quiera dar a la cubierta verde. Antes de determinar el tipo de cubierta que se va a

instalar se deben analizar los requerimientos de cada edificación, estableciendo los siguientes parámetros:

- Tipo de edificación (nueva o remodelación)
- Características del techo:
  - o Pendiente
  - o Capacidad de carga
  - o Altura
- Uso de la cubierta
  - o Transitable
  - o Requerimientos de retención de aguas lluvias
  - o Interés estético
  - o Certificación ambiental
- Ubicación del edificio
  - o Clima
  - o Sombras
  - o Viento
- Presupuesto
- Mantenimiento

En el mercado se pueden encontrar tres tipos de cubiertas verdes: extensivos, semi-intensivos e intensivos. Sus características se muestran en la tabla 5.7.

Las cubiertas verdes no requieren espacio adicional en el desarrollo urbano. Por lo tanto, son adecuadas en lugares ya desarrollados dentro de la ciudad, donde el espacio es limitado para otras técnicas.

Estas cubiertas pueden adaptarse fácilmente, siempre y cuando exista suficiente resistencia para soportar las cargas en el techo, es decir que con elección adecuada de los materiales se pueden utilizar en casi cualquier edificio.



En su diseño se deben considerar parámetros ambientales en el lugar de instalación, tales como la altura de la cubierta, su exposición al viento, la orientación de la cubierta con el sol, la sombra de los edificios vecinos y el clima (2).

**Tabla 5.7 Tipos de cubiertas verdes (35)**

<b>Característica</b>	<b>Extensivo</b>	<b>Semi-intensivo</b>	<b>Intensivo</b>
Espesor sustrato	< 15 cm	10-20 cm	> 15 cm
Cobertura vegetal transitable/No transitable	No transitable	Parcialmente transitable	Transitable
Peso saturado	50-170 kg/m <sup>2</sup>	150-250 kg/m <sup>2</sup>	>245 kg/m <sup>2</sup>
Diversidad vegetal	Poca	Mayor	Máxima
Mantenimiento	Mínimo	Variable	Alto
Tipo de vegetación	Rastreras	Arbustos pequeños y pastos ornamentales	Arbustos y árboles pequeños



**Figura 5.9 Cubiertas verdes. (35)**

### ✓ **Reúso del agua en edificaciones**

El agua lluvia que cae sobre las edificaciones en cubiertas, superficies duras o estacionamientos se puede almacenar y reutilizar para diferentes propósitos, entre los que se encuentran el desagüe de inodoros y el riego.

Pueden existir edificaciones donde el agua lluvia se reutilice como agua potable, pero esto sugiere sistemas sofisticados de tratamiento que garanticen las características mínimas requeridas para su consumo.

Estos sistemas se consideran parte de las estructuras SUDS, debido al almacenamiento y tratamiento del agua lluvia.

#### **b. En zonas urbanas**

### ✓ **Superficies permeables (30) (36)**

Las superficies permeables permiten el paso del agua lluvia a través de su estructura durante el evento de esorrentía. El agua se retiene para infiltrarla en el suelo adyacente o para transportarla aguas abajo en el sistema de drenaje urbano cuando el suelo del sitio no tiene las características de infiltración adecuadas. Además de la captación del agua lluvia, las superficies permeables actúan como soporte estructural.



**Figura 5.10 Superficies permeables. (30) (36)**

Estas superficies se diseñan con una gran variedad de materiales, como césped o grava con refuerzos, adoquines con ranuras, bloques porosos y demás materiales porosos, como se muestra en la figura 5.10. El empleo de este tipo de superficies se limita a zonas sin vehículos pesados, como por ejemplo parqueaderos, calles residenciales, calles de densidad de tráfico medio, cubiertas verdes, aceras y zonas de recreo.

### ✓ Pozos de infiltración

Estos dispositivos son el tipo más común de infiltración en el Reino Unido. Almacenan rápidamente el escurrimiento de una casa o de un desarrollo urbanístico y permiten su infiltración eficaz en el suelo.

Por lo general, los pozos son de forma cuadrada o rectangular, rellenos de escombros o material permeable, agujerados alrededor en las paredes y en la base para permitir la infiltración en el suelo. Se sitúan bajo el césped, sin una disposición formal, para el acceso y la inspección. El relleno o medio poroso debe proporcionar buena capacidad de almacenamiento, para permitir que el tamaño de la estructura se reduzca al mínimo.

Los pozos de infiltración pueden reducir el volumen de esorrentía y facilitan la recarga de aguas subterráneas. El tiempo necesario para que las aguas pluviales se infiltren a través de la base o los lados del dispositivo depende de la forma y el tamaño del pozo de infiltración y de las características de infiltración del suelo.

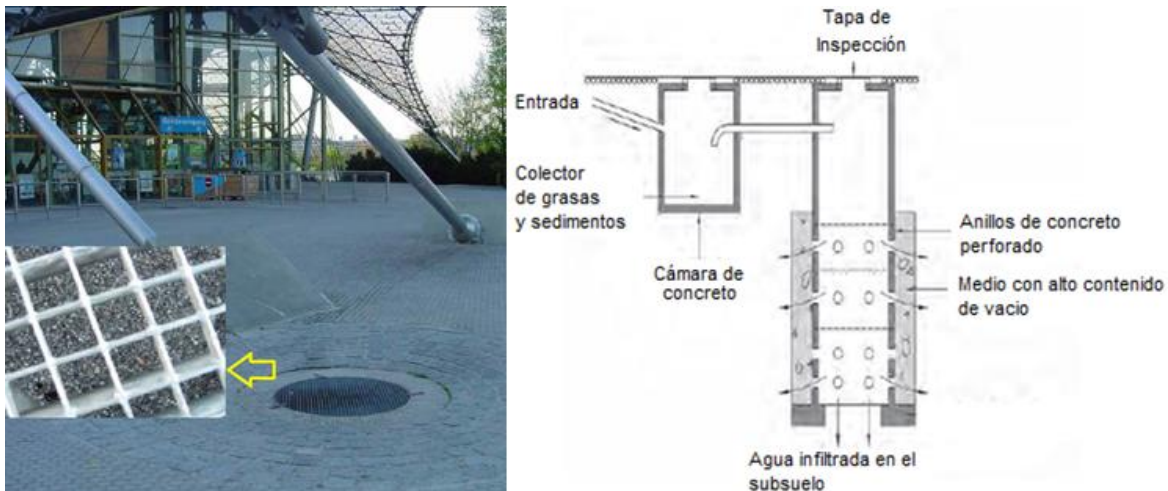


Figura 5.11 Pozo de infiltración (36) (2)

Los pozos de infiltración son ideales para áreas pequeñas, como cubiertas de viviendas residenciales o comerciales, pero no se recomiendan para el drenaje de escorrentía en zonas de gran contaminación ni en zonas con jardines, debido al riesgo de obstrucción y a la contaminación de las aguas subterráneas. Se recomienda que las aguas lluvias pasen por un tratamiento previo a la descarga en el pozo de infiltración.

Estos pozos se utilizan generalmente para recibir la escorrentía de propiedades residenciales. Sin embargo, pueden drenar un conjunto de casas con una unidad grande o un grupo enlazado de unidades.

Así mismo, los pozos enlazados también se pueden utilizar para drenar carreteras y zonas de parqueo, pero se requiere un cuidado especial para asegurar que los niveles de sedimentos y contaminantes se reduzcan a niveles aceptables antes de pasar todo el flujo al dispositivo.



**Figura 5.12 Estructura de los pozos de inspección. (36) (2)**

### ✓ Zanjas

Son excavaciones poco profundas, llenas de escombros, piedra o de otros medios porosos que proporcionan almacenamiento temporal de la escorrentía, para infiltración en el suelo o para filtración y transporte de las aguas lluvias.

Las zanjas se pueden modificar incluyendo cubierta vegetal. A este tipo de estructuras se les denomina biofiltros.

#### a. Zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración son la forma lineal de los pozos de infiltración. Estas estructuras filtran el agua lluvia a través del suelo, reducen el volumen de escorrentía y el caudal pico y mejoran las condiciones de las estructuras de drenaje aguas abajo. Además, permiten la recarga de las aguas subterráneas.

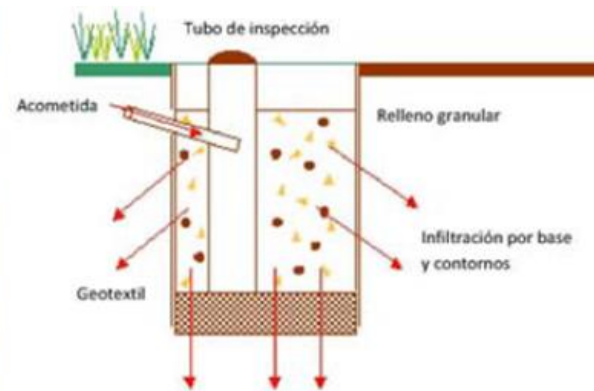
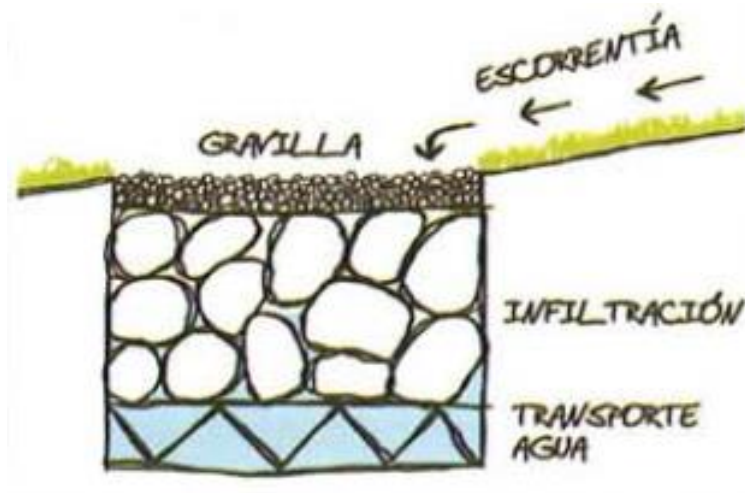


Figura 5.13 Zanjas de infiltración. (36) (2)

#### b. Zanjas filtrantes o drenes filtrantes/ drenes franceses y (*Filter Drains, French Drains o Dry Well*)

Las zanjas de filtración se utilizan cuando los suelos circundantes son impermeables o donde la contaminación no permite la infiltración del agua lluvia. Éstas proporcionan una zona de sedimentación para eliminar los sedimentos finos y fomentar la filtración, la adsorción y los procesos de biodegradación.

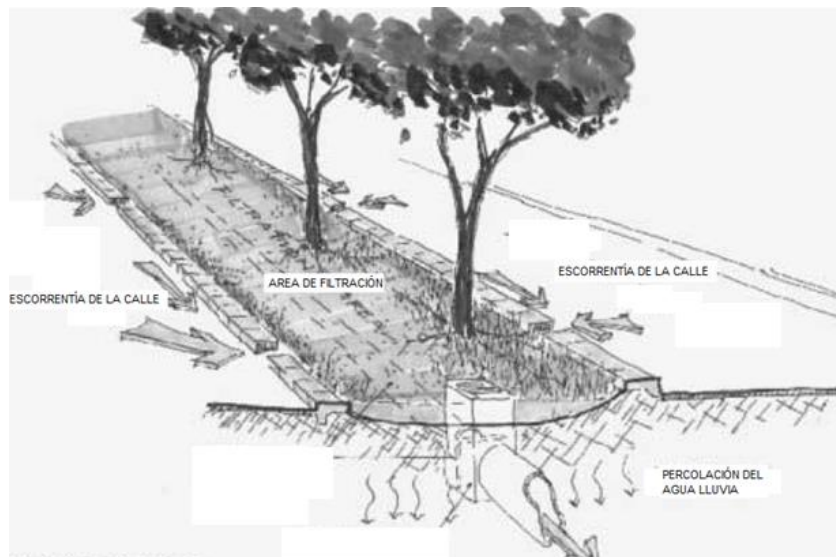
Sin embargo, la capacidad de tratamiento de las zanjas es limitada, de tal modo que se utilizan como zonas de almacenamiento durante el evento de escorrentía (7).



**Figura 5.14 Zanjas de filtración. (7)**

El espacio que requieren estas estructuras se puede incorporar en el paisajismo de la zona.

Por ser estructuras de transporte del agua lluvia, las zanjas de filtración podrían reemplazar las tuberías convencionales, pero requieren un mantenimiento constante para evitar la obstrucción de los filtros, por lo que se deben considerar como un complemento y no como un remplazo.



**Figura 5.15 Zanja de filtración. (7)**

### c. Biofiltro/ Biorretención (31)

Los biofiltros, denominados también de biorretención o jardines de lluvia, constituyen zanjas con cubierta vegetal. La función de estas estructuras es captar el agua lluvia permitiendo que se infiltre, almacenándola temporalmente mientras se eliminan los contaminantes.

Si las condiciones del suelo circundante lo permiten la escorrentía se infiltra, de otro modo retorna al sistema de drenaje de aguas lluvias luego del evento. Parte del agua lluvia captada se elimina a través de la evaporación y la transpiración de las plantas.

La vegetación de estos biofiltros es muy diversa, razón por la cual tolera insectos, enfermedades, contaminación y cambios climáticos, haciendo de ella una estructura resistente. El término jardín de lluvia se refiere a una estructura de biofiltro que se encuentra generalmente en zonas residenciales.

En resumen, los biofiltros son estructuras de captación que reducen el volumen de escorrentía, el caudal pico y los contaminantes del agua lluvia.



**Figura 5.16 Estructuras de biorretención (a la derecha biofiltro ubicado en una zona residencial, a la izquierda como estructura de captación sobre una vía urbana) (31)**

Las estructuras de biorretención se pueden utilizar en diversos lugares, como pequeñas áreas destinadas a zonas residenciales y, de manera extensiva, en estacionamientos, incorporadas en los separadores o áreas perimetrales, como se aprecia en la figura 5.17.



**Figura 5.17 Zona de biofiltro en un estacionamiento junto con un sumidero convencional para evitar el desbordamiento del biofiltro (31)**

En caminos y carreteras se pueden incorporar en los separadores (figura 5.18).



**Figura 5.18 Biofiltros (a la izquierda celda de biorretención de la calle, Los Ángeles CA, a la derecha biorretención de área lineal a lo largo de la carretera)**

(31)



Una limitante para este tipo de estructuras en zonas urbanas de alta densidad ya desarrolladas es el espacio que requieren.

✓ **Cunetas verdes (2)**

Las cunetas verdes son canales amplios, poco profundos y cubiertos con vegetación, en los que se puede almacenar, transportar y, si el suelo circundante lo permite, infiltrar la escorrentía superficial. La velocidad del agua lluvia en la cuneta debe ser baja para permitir la sedimentación de partículas contaminantes. En altas pendientes las cunetas deben contar con diques o muros para disminuir la velocidad del flujo.

Las cunetas verdes en carretera pueden reemplazar las cunetas convencionales y las tuberías de drenaje.

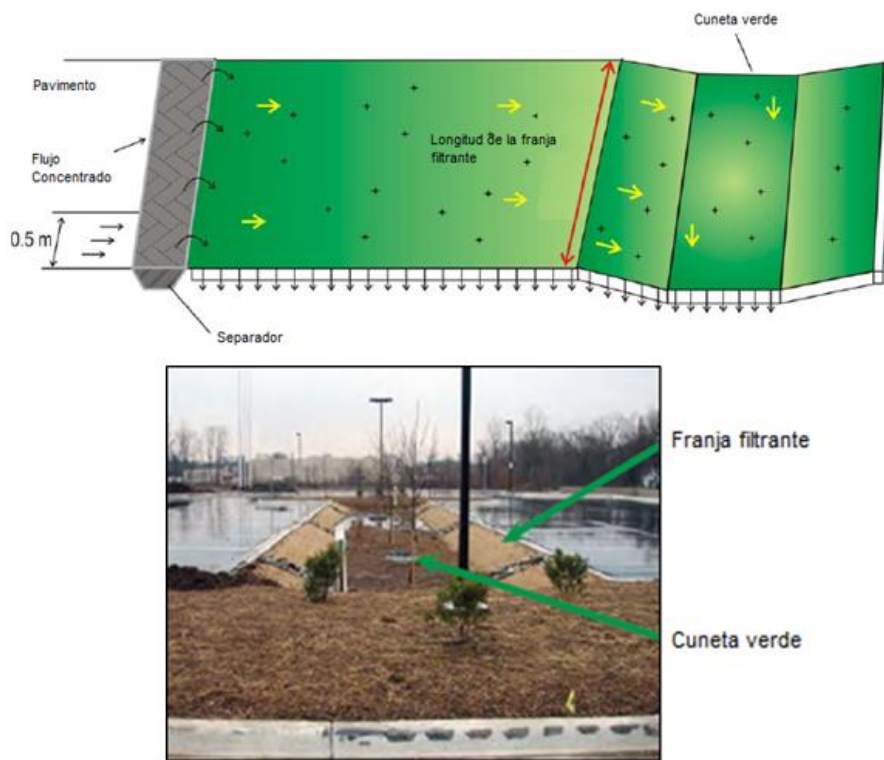


**Figura 5.19 Cunetas verdes. Cunetas con diques y muros. (2)**

Las cunetas verdes se deben incorporar en el paisaje de la zona y en espacios abiertos, teniendo en cuenta la ubicación, el uso y demás características del lugar. Son difíciles de incorporar en zonas de alta densidad ya desarrolladas, debido al espacio que requieren. Se recomiendan para cuencas pequeñas con áreas impermeables (2).

## ✓ Franjas filtrantes (2)

Son franjas con pendiente uniforme y suave, de césped u otra vegetación densa. Estas estructuras captan el agua lluvia de zonas adyacentes impermeables para pre-tratamiento a través de la filtración. La escorrentía fluye a través de la estructura a una velocidad lo suficientemente baja para su adecuada filtración. Las franjas filtrantes deben proporcionar velocidades más bajas que las otras estructuras, ya que su función principal es retener sedimentos para descargar el agua pre-tratada a otras estructuras SUDS. En la figura 5.20 se presenta una franja filtrante junto a una cuneta verde.



**Figura 5.20 Franja filtrante. (2)**

Las franjas filtrantes interceptan la escorrentía que procede de las zonas impermeables adyacentes, como parqueaderos, calles y tejados. Es una técnica empleada para el pretratamiento y el transporte a otras estructuras SUDS.

Estas franjas se deben integrar con el diseño general del sitio y el paisaje. Sin embargo, no son adecuadas donde exista tráfico peatonal.

### **c. Almacenamiento**

#### **✓ Depósitos de infiltración (31)**

Los depósitos de infiltración son áreas poco profundas, diseñados para almacenar e infiltrar la escorrentía de aguas lluvias. Tienen más capacidad de retención de agua proveniente de cuencas de mayor área que los pozos y las zanjas de infiltración.

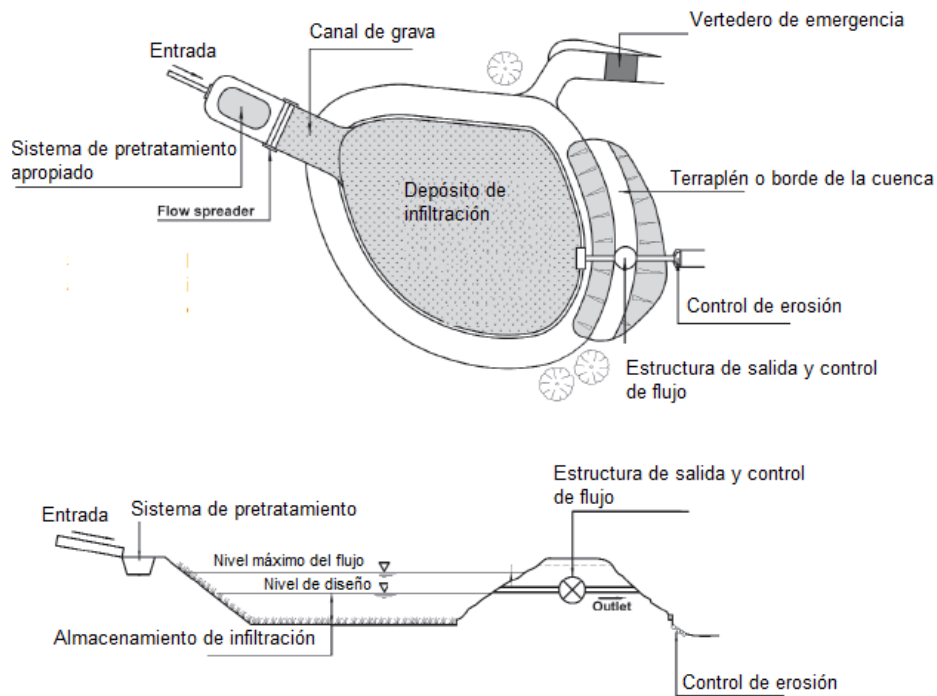
Estos depósitos se emplean para drenar la escorrentía de una serie de propiedades. Sin embargo, no se deben utilizar para drenar áreas extensas debido a la gran contribución de sedimentos y contaminación. En general, los depósitos de infiltración deben estar diseñados para tratar únicamente pequeños eventos de lluvia.

Los depósitos requieren estructuras previas para el pretratamiento del agua lluvia y la eliminación de sedimentos que eviten la obstrucción de la superficie de infiltración.

Sus principales objetivos son transformar el agua superficial en agua subterránea y eliminar los contaminantes de las aguas lluvias, a través de los procesos de filtración que se producen dentro de los suelos bajos del sistema. Esta estructura reduce el volumen y el pico de la escorrentía por la infiltración de los suelos y, además, por la evapotranspiración de la vegetación.



**Figura 5.21 Depósito de infiltración. (31)**



**Figura 5.22 Esquema de un depósito de infiltración. (31)**

En la figura 5.22 se muestra un esquema típico de planta y de perfil de un depósito de infiltración.

Estos depósitos requieren una gran área accesible, relativamente plana y altamente permeable. No se deben ubicar en terrenos inestables. La estabilidad del terreno se debe verificar mediante la evaluación de las condiciones del suelo y del agua subterránea del sitio. No se deben emplear para tratar la escorrentía en zonas con alta contaminación (2).

✓ **Depósitos de detención y tanques subterráneos**

Son zonas inundables que permiten el almacenamiento temporal de las aguas lluvias durante el evento de escorrentía para descargarla controladamente al sistema de drenaje. Son estructuras generalmente vacías, excepto durante e inmediatamente después de un evento lluvioso (36).



**Figura 5.23 Depósito de detención (a la izquierda depósito a cielo abierto, a la derecha depósito enterrado) (36)**

Existen dos tipos de depósitos: de superficie y enterrados. Los depósitos de superficie, además de almacenar el agua para el manejo del drenaje urbano, tienen otros usos como los recreacionales en parques o instalaciones deportivas. Cuando no se dispone de espacio o terreno en la superficie, o cuando no se recomienda este tipo de técnicas a cielo abierto, se construyen en el subsuelo (7).

#### ✓ **Estanques de retención**

Son embalses o lagunas artificiales, diseñados para mantener una reserva de agua permanente que favorece el crecimiento de las plantas. La escorrentía que capta la estructura se retiene en una piscina de pretratamiento hasta que se produce un nuevo evento que empuja el agua hacia la piscina de retención permanente. Un parámetro de diseño fundamental para estos sistemas es el tiempo de retención en el pretratamiento, para que se produzca la eliminación de los contaminantes a través de la sedimentación y por procesos de degradación biológica (36).



**Figura 5.24 Estanque de retención. (36).**

✓ **Humedales artificiales**

Los humedales son similares a los estanques de retención, pero de menor profundidad y con mayor densidad de vegetación, aportan un gran potencial ecológico, estético, educativo y recreativo (7). Los humedales artificiales cumplen la misma función que los humedales naturales, que es tratar las escorrentías urbanas proporcionando un almacenamiento temporal por encima del nivel de agua permanente (36).



**Figura 5.25 Humedal. (7).**

## 6. CAPTACIONES DE DRENAJE URBANO NO CONVENCIONALES

Con base en la revisión bibliográfica realizada en el presente trabajo, las dimensiones de las estructuras de los SUDS dependen directamente de su funcionamiento. Tomando en cuenta que estos sistemas contemplan múltiples prácticas, este trabajo sólo se enfoca en el estudio detallado de las estructuras que tengan la misma función básica que las de captación convencional, que consiste en captar el drenaje urbano de aguas lluvias en las vías urbanas.

De acuerdo con la clasificación adoptada en este trabajo de investigación, las estructuras de captación y transporte del agua de escorrentía en zonas urbanas son las siguientes: superficies permeables; pozos de infiltración; zanjas de infiltración, filtración y biofiltros; cunetas verdes; franjas filtrantes y redes troncales.

Con base en la información de la tabla 6.3, todas las estructuras catalogadas como de captación tienen en común el tipo de tratamiento de la escorrentía. Estas estructuras tratan el agua por medio de la filtración o la infiltración, pero con diferentes fines o propósitos, lo cual las diferencia unas de otras.

Este trabajo sólo se centra en las captaciones que se realizan sobre las vías urbanas, para lo cual se seleccionaron las siguientes estructuras, para su estudio detallado:

- a. Superficies permeables
- b. Zanjas - Infiltración
  - Filtración / Drenes franceses
  - Biofiltros

Estas captaciones son estructuras que de una u otra forma complementan o sustituyen la función de los sumideros y cunetas en el drenaje urbano. Se diferencian de las captaciones convencionales porque a través del almacenamiento temporal del drenaje y de las técnicas de filtración o infiltración proporcionan un tratamiento adicional a la escorrentía, reduciendo el volumen de escorrentía puntual, el caudal pico, los

contaminantes y los sedimentos. Sin embargo, cabe discutir si estas estructuras realmente proporcionan estos beneficios y si lo hacen, qué implicaciones tiene.

### **6.1. Criterios de Diseño Generales. Estructuras SUDS**

Para el diseño hidráulico de las estructuras SUDS se deben tener en cuenta las características de la cuenca, tales como la calidad del agua, la morfología del sitio y criterios hidrológicos.

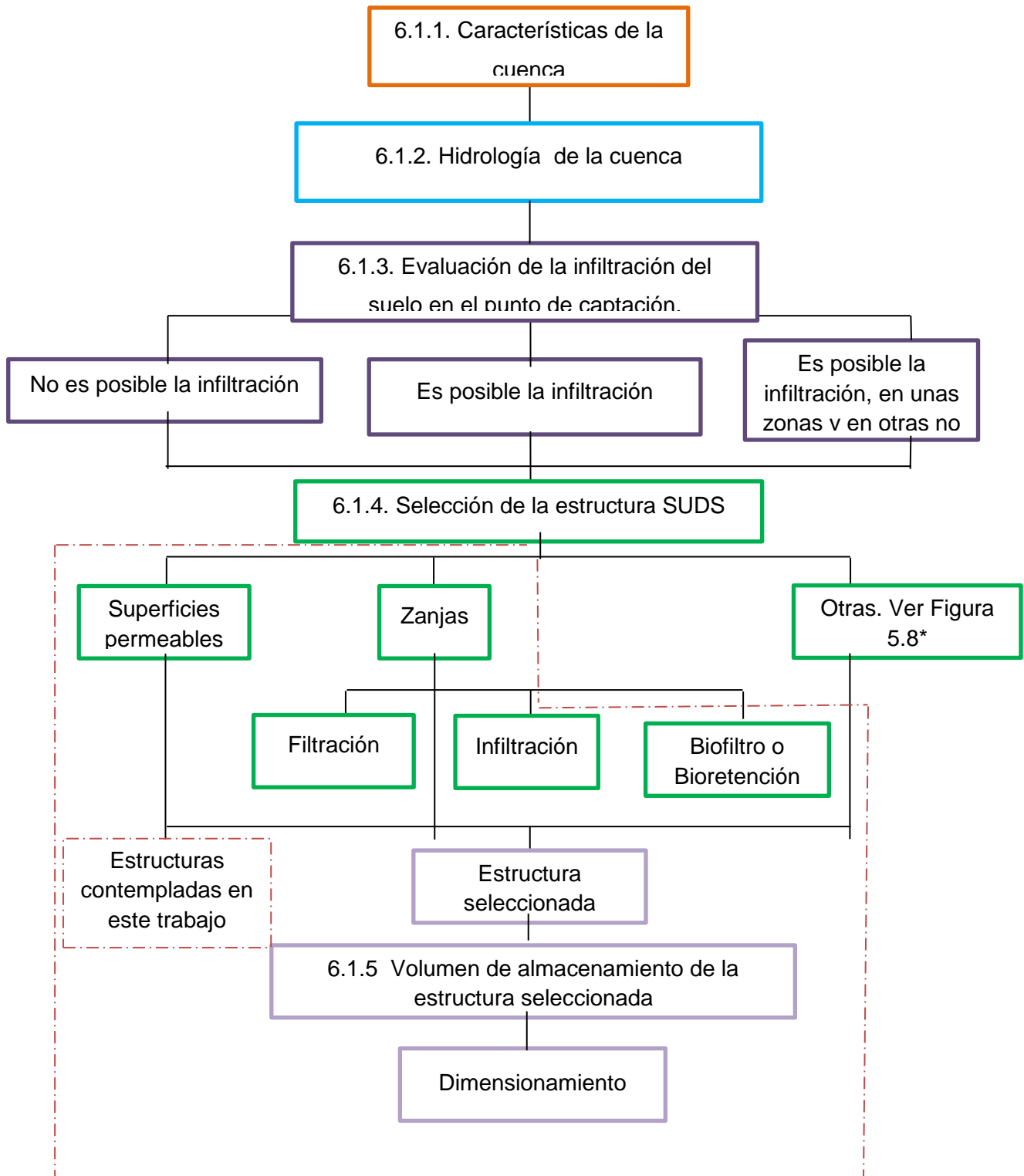
Una vez identificadas las características de la cuenca se puede determinar si es posible la infiltración en el suelo, ya sea parcial o totalmente. Si es total, se diseña un sistema que incluya la infiltración de la escorrentía, pero si es parcial deben identificarse las áreas donde la escorrentía pueda infiltrarse y, de no ser posible, las estructuras se deben modificar con subdrenajes que transporten la escorrentía hacia otras estructuras aguas abajo.

Una vez seleccionado el tipo de estructura más conveniente, se debe calcular su capacidad hidráulica. Más adelante se presentan, de manera detallada, los criterios que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar estructuras no convencionales del drenaje sostenible, SUDS. En la figura 6.1 se presentan los criterios de diseño.

Aunque la figura 6.1 no presenta la totalidad de las estructuras SUDS, el objeto de estudio de este trabajo corresponde únicamente a las superficies permeables y zanjas, teniendo en cuenta que sólo se detallan las estructuras que sustituyen o complementan las convencionales. Sin embargo, en el capítulo 5 se describe la totalidad de las estructuras SUDS, incluyendo las que se estudian detalladamente en esta sección. En la figura 5.8 se presenta la clasificación adoptada por este trabajo del total de las estructuras SUDS.



Figura 6.1 Criterios generales de diseño



### 6.1.1. Características de la cuenca

Entre las características de la cuenca que se deben tener en cuenta para el diseño de estructuras de captación está la calidad del agua de la escorrentía y la morfología del sitio. La calidad del agua se ve afectada por las actividades urbanas propias de la urbanización. Entre los contaminantes se encuentra sedimentos, pesticidas, herbicidas, materia orgánica, metales, hidrocarburos, patógenos y nutrientes. En la tabla 6.1 se presentan las fuentes y los efectos de los diferentes contaminantes que se encuentran en las escorrentías urbanas (5).

**Tabla 6.1 Fuentes y contaminantes en la escorrentía urbana**

<b>Contaminantes</b>	<b>Fuentes</b>
<b>Sedimentos:</b> sólidos suspendidos y sedimentables, basuras flotantes	Calles, césped, autopistas, actividades de construcción, deposición atmosférica, erosión de canales de drenaje
<b>Pesticidas y herbicidas</b>	Césped en los patios y jardines, paisaje de áreas industriales o comerciales, lavados del suelo
<b>Materia orgánica</b>	Césped y hojas en patios y jardines, paisaje en áreas comerciales y desechos de animales
<b>Metales</b>	Automóviles, áreas industriales, erosión de los suelos, techos y procesos de combustión
<b>Hidrocarburos:</b> grasas, aceites y combustibles	Estacionamientos, áreas de mantenimiento de vehículos, estaciones de gasolina y áreas industriales
<b>Patógenos:</b> virus y bacterias	Césped, caminos, reboses del sistema de alcantarillado sanitario, desechos de animales y sistemas sépticos
<b>Nutrientes</b>	Fertilizantes, desechos de animales, detergentes, escape de automóviles

Tomando en cuenta estas consideraciones se evalúa la mejor ubicación de las estructuras de captación y se determina el tipo de tratamiento que requieren.

Por otra parte, la tipología del sitio determina las cuencas que drenan a las estructuras de captación, el área y su grado de permeabilidad.

### **6.1.2. Hidrología del sitio**

Para calcular la precipitación o evento de diseño para el dimensionamiento de las estructuras de captación es necesario determinar el régimen de precipitaciones del sitio. El evento de diseño puede obtenerse mediante la sintetización de la tormenta a partir de precipitaciones máximas o curvas IDF, o mediante una serie histórica de eventos. La selección del evento de diseño depende de la función de la estructura de captación.

Existen varios métodos para calcular la escorrentía afluente a la estructura de captación; no obstante, para las cuencas menores a 1 km<sup>2</sup> se recomienda el método racional.

### **6.1.3. Infiltración en el suelo (2)**

Algunas estructuras de captación SUDS utilizan la infiltración como una técnica para disponer de las aguas lluvias, depositándolas temporalmente en el suelo para reducir el volumen de escorrentía durante un evento de lluvia. Esta técnica reduce los volúmenes de almacenamiento de dichas estructuras.

Para una adecuada infiltración del agua el suelo debe ser permeable y no saturado. Adicionalmente, existen situaciones en las cuales no se recomienda la infiltración en un determinado sitio, como por ejemplo en lugares donde la mala calidad del agua de escorrentía de las aguas lluvias presenta amenaza para las aguas subterráneas, la capacidad de infiltración del suelo sea baja o reducida, los niveles freáticos sean altos o la cimentación de las edificaciones pueda estar en riesgo

Durante la instalación de una estructura SUDS que utilice la técnica de infiltración se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- El rendimiento de los sistemas de infiltración depende de las propiedades del suelo en el sitio.
- La capacidad de infiltración se describe mediante el uso de un coeficiente de infiltración, que es la tasa de infiltración a largo plazo en el suelo por el área de la infiltración. Esta tasa está relacionada con la permeabilidad del suelo, que es alta para los suelos de grano grueso, como las arenas y gravas, y baja para suelos finos, como limos y arcillas.

En la tabla 6.2 se presentan los coeficientes típicos de infiltración para diferentes tipos de suelo.

**Tabla 6.2 Coeficientes típicos de infiltración (2)**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Coeficientes típicos de infiltración (m/h)</b>
<b>Buena infiltración media</b>	
Gravas	10 - 1000
Arena	0.1 - 100
Limos	0.01 - 0.1
<b>Baja infiltración media</b>	
Arcilla	<0.0001
Roca	0.01 - 0.1

Estos coeficientes proporcionan un primer indicador de la magnitud de capacidad de infiltración del suelo, pero se debe tener en cuenta que la estructura de éste es variable, que el contenido de arcillas y la presencia de fisuras en la roca pueden afectar de manera significativa la capacidad de infiltración. Por esta razón, es necesario realizar pruebas de campo para determinar los coeficientes de infiltración para el diseño de las estructuras de captación SUDS. Durante su construcción se debe tener especial cuidado para no afectar las tasas de infiltración existentes.

#### **6.1.4. Selección de la estructura SUDS**

Una vez identificadas las características e hidrología de la cuenca y la infiltración del suelo en el sitio, es posible definir el tipo de estructura de captación SUDS que se debe implementar. Como se mencionó, existen diferentes tipos de estructuras SUDS; sin embargo, se seleccionan de acuerdo con los siguientes criterios generales, establecidos con base en la recopilación y el análisis de información realizada para el presente trabajo:

- Características del sitio
- Función de la estructura
- Evento de escorrentía
- Tratamiento del agua lluvia

##### **Características del sitio**

Entre éstas se encuentran el espacio disponible para la estructura y el tipo de sitio, como por ejemplo estacionamientos, vías urbanas, zona comercial, residencial o industrial, entre otros usos, que determinan el tipo de estructura conveniente para cada caso.

##### **Función de la estructura**

De acuerdo con la clasificación propuesta en este trabajo, las estructuras se clasifican en función al papel que desempeñan en el manejo de la escorrentía del drenaje urbano (ver capítulo 5 y figura 5.8).

- Evento de escorrentía

En la definición de las estructuras SUDS se estableció que buena parte de sus características de diseño están relacionadas con el almacenamiento temporal del evento de escorrentía, para descargarlo controladamente o infiltrarlo en el suelo del sitio luego del evento. Sin embargo, no todas las estructuras se pueden diseñar para almacenar todos los eventos de escorrentía, algunas son más apropiadas para eventos frecuentes y otras para eventos externos.

- Tratamiento del agua lluvia

El tratamiento del agua lluvia en las estructuras SUDS corresponde a los procesos de filtración o biofiltración, infiltración y almacenamiento.

- *Filtración y biofiltración*

Los contaminantes que transportan las aguas de drenaje urbano asociados a los sedimentos se pueden filtrar, lo cual se realiza en las SUDS a través de plantas, capas de suelo granular y geotextiles.

- *Infiltración*

Es un proceso mediante el cual se retiene la escorrentía en el suelo del sitio de captación y se transporta fuera del proceso de drenaje urbano, reduciendo el pico y el volumen de la escorrentía. Donde no exista riesgo de contaminación este proceso se puede utilizar para recargar las fuentes de agua subterránea, que es lo ideal para el manejo de la escorrentía, porque restaura el proceso hidrológico previo a la urbanización. No obstante, los rangos de infiltración varían con el tiempo, el tipo y la condición del suelo. Este proceso no se puede utilizar en áreas donde las fuentes de agua subterránea sean vulnerables.

- *Almacenamiento*

Es el proceso mediante el cual se retiene temporalmente el agua lluvia para descargarla de manera controlada luego del evento, reduciendo el pico de escorrentía. La sedimentación es uno de los mecanismos primarios del tratamiento de agua. El mayor componente de la contaminación de la escorrentía son las partículas de sedimentos y, por lo tanto, su reducción contribuye significativamente a la disminución de las cargas contaminantes.

De acuerdo con los criterios establecidos para la selección de las estructuras SUDS, se elaboró la tabla 6.3, donde se presentan las características del sitio, la función de acuerdo con la clasificación adoptada en este trabajo, el evento de escorrentía para el cual se debe diseñar la estructura y el proceso de tratamiento utilizado.

**Tabla 6.3 Selección de estructuras SUDS, de acuerdo con los criterios establecidos en este trabajo**

<b>Técnica SUDS</b>	<b>Uso. Características del sitio</b>	<b>Función</b>	<b>Evento de escorrentía</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Captación</b>
<b>Cubiertas verdes</b>	Recubren tejados y terrazas de todo tipo. Interceptan y retienen la escorrentía, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando el caudal pico.	Captación y transporte. Edificaciones	Frecuente	Filtración	<b>NO</b>
<b>Reúso del agua en edificaciones</b>	El agua lluvia que cae sobre las edificaciones en techos, superficies duras o estacionamientos se puede almacenar y reutilizar para diferentes propósitos, entre los que se encuentran el desagüe de inodoros y el riego.	Captación y transporte. Edificaciones	Frecuente	Pretratamiento y reúso	<b>NO</b>
<b>Superficies permeables</b>	Las superficies permeables están compuestas por secciones de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua. El agua lluvia se almacena temporalmente en la estructura antes de la infiltración o vertido hacia el afluente u otras estructuras para el manejo del drenaje urbano. El uso de este tipo de superficies se limita a zonas sin vehículos pesados, como parqueaderos, calles residenciales, calles de densidad de tráfico media, cubiertas ajardinadas, aceras, zonas de recreo, etc.	Captación y transporte. En zonas urbanas	Frecuente	Infiltración y filtración	<b>SÍ</b>
<b>Pozos de infiltración</b>	Son pozos con estructuras llenas de material permeable, agujereados en la base y las paredes para permitir la infiltración en el suelo. Son adecuados para áreas pequeñas como techos de viviendas residenciales o comerciales, pero no son recomendables para el drenaje de escorrentía en zonas de gran contaminación ni en zonas con jardines, debido al riesgo de obstrucción.	Captación y transporte. En zonas urbanas	Frecuente	Infiltración	<b>SÍ</b>
<b>Zanjas de infiltración</b>	Las zanjas de infiltración son la forma lineal de los pozos de infiltración. Estas estructuras filtran el agua lluvia a través del suelo, reduciendo el volumen de escorrentía y el caudal pico. Además, permiten la recarga de las aguas subterráneas de la ciudad.	Captación y transporte. En zonas urbanas	Frecuente	Infiltración	<b>SÍ</b>
<b>Zanjas filtrantes o drenes filtrantes</b>	Captan y filtran la escorrentía de superficies impermeables contiguas con el fin de transportarlas hacia aguas abajo. Debido a su forma estrecha, las zanjas se pueden adaptar a muchos tipos de sitios; sin embargo, no se utilizan en sitios desarrollados.	Captación y transporte. En zonas urbanas	Frecuente	Filtración	<b>SÍ</b>

**Tabla 6.3. (Continuación) Selección de estructuras SUDS, de acuerdo con los criterios establecidos en este trabajo**

<b>Técnica SUDS</b>	<b>Uso. Características del sitio</b>	<b>Función</b>	<b>Evento de escorrentía</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Captación</b>
<b>Zanjas de biorretención</b>	Son zanjas vegetadas que captan la escorrentía dentro de un área con vegetación, permitiendo la filtración o infiltración. Reducen el volumen de escorrentía, el caudal pico, los sólidos en suspensión y los contaminantes.	Captación y transporte. En zonas urbanas	Frecuente	Filtración e infiltración	<b>SÍ</b>
<b>Cunetas verdes</b>	Son canales amplios, poco profundos, cubiertos con vegetación, en los que se pueden almacenar, transportar y, si el suelo circundante lo permite, infiltrar la escorrentía superficial	Captación y transporte. En zonas urbanas	Frecuente	Filtración e infiltración	<b>SÍ</b>
<b>Franjas filtrantes</b>	Transporte y pretratamiento. Interceptan la escorrentía proveniente de zonas impermeables como parqueaderos, calles y tejados. Su función principal es la retención de sedimentos para descargar el agua pretratada a otras estructuras, para el manejo de la escorrentía aguas abajo.	Captación y transporte. En zonas urbanas	Frecuente	Filtración	<b>SÍ</b>
<b>Depósitos de infiltración</b>	Almacenan e infiltran la escorrentía, de cuencas mayores que los pozos y las zanjas. Requieren grandes áreas accesibles, relativamente planas y altamente permeables.	Almacenamiento	Eventos extremos	Infiltración	<b>NO</b>
<b>Depósitos de detención</b>	Los depósitos de detención son una depresión de vegetación sobre el terreno. Son estructuras generalmente vacías, salvo durante e inmediatamente después de un evento lluvioso. La función principal de estas estructuras es actuar como zona inundable, permitiendo almacenar temporalmente el agua lluvia durante el evento de escorrentía para luego descargarla controladamente.	Almacenamiento	Eventos extremos	Almacenamiento	<b>NO</b>
<b>Estanque de retención</b>	Son embales o lagunas artificiales, diseñados para mantener una reserva de agua permanente que favorezca el crecimiento de las plantas. La escorrentía que capta la estructura se retiene en una piscina de pretratamiento hasta que se produzca un nuevo evento que empuje el agua hacia la piscina de agua permanente.	Almacenamiento	Eventos extremos	Almacenamiento	<b>NO</b>
<b>Humedales artificiales</b>	Son similares a los estanques de detención pero de menor profundidad y con mayor densidad de vegetación.	Almacenamiento	Eventos extremos	Almacenamiento	<b>NO</b>



### 6.1.5. Volumen de almacenamiento de las estructuras SUDS

Existen diversos métodos y criterios para calcular el volumen de almacenamiento para las estructuras SUDS. A continuación se presentan los criterios del Manual de Georgia, US EPA (Estados Unidos) y el Ciria (Inglaterra).

#### 6.1.5.1. *Cálculo de almacenamiento de las estructuras SUDS.*

##### ***Georgia (37)***

Para calcular la capacidad de las estructuras SUDS, el manual de Georgia (15) considera los siguientes criterios de dimensionamiento:

- Calidad del agua.
- Protección a la erosión de los cauces y afluentes aguas abajo del sistema de drenaje.
- Protección de las llanuras de inundación.
- Controlar la escorrentía en los eventos de lluvia extremos

Estos criterios fueron integrados en el método “Criterios unificados de dimensionamiento para las estructuras de drenaje pluvial” (Unified stormwater sizing criteria), en el que se desarrollaron métodos para el dimensionamiento y diseño de las estructuras SUDS no convencionales. Para un adecuado manejo de las aguas lluvias, estos criterios se pueden utilizar en conjunto; cuando se hace es posible controlar diferentes eventos de escorrentía, desde los más frecuentes hasta los eventos extremos con periodos de retorno de 100 años. A continuación se presenta en detalle el cálculo del volumen de almacenamiento para cada uno de los criterios.

##### **a. Volumen de almacenamiento. Calidad del agua lluvia**

Este criterio determina el volumen de tratamiento para remover un porcentaje significativo del total de los contaminantes inherentes en la escorrentía del agua lluvia. De acuerdo

con el manual, este volumen corresponde al 85% de la precipitación promedio anual, que para el estado de Georgia corresponde a 1,2 pulgadas (30,48 mm).

Este porcentaje se considera el punto óptimo entre la rentabilidad y la capacidad de remoción. Si se capta más del 85% de la precipitación media anual se produciría sólo un pequeño aumento en la remoción de contaminantes, pero se incrementaría considerablemente el tamaño de las estructuras SUDS, elevando sus costos. El valor de 1,2" (30,48 mm) se obtuvo a través de un análisis de precipitaciones de 12 ubicaciones en todo el estado de Georgia y corresponde al valor medio. Por otro lado, el volumen de almacenamiento de calidad del agua también está relacionado directamente con el área impermeable del sitio.

El cálculo del volumen de almacenamiento de calidad del agua requerido para las estructuras SUDS es:

$$V_t = P_e R_v A * 10 \quad (6.1)$$

Donde:

$V_t$  = volumen de almacenamiento calidad del agua ( $m^3$ )

$P_e$  = el 85% de la precipitación promedio anual (mm).

$R_v$  = coeficiente volumétrico de escorrentía

$$R_v = 0,05 + 0,009(I) \quad (6.2)$$

Donde:

(I) = porcentaje de área impermeable

A = área de drenaje (Ha)

El coeficiente de escurrimiento volumétrico ( $R_v$ ) se deriva del análisis de regresión realizado en diferentes ciudades de Estados Unidos sobre los datos de precipitación del volumen de escorrentía. Es un método corto adecuado para calcular el volumen de la escorrentía para eventos pequeños, normalmente considerados en los cálculos de la calidad del agua lluvia.

El volumen de almacenamiento de calidad del agua determina el tamaño de las estructuras para eventos más frecuentes (de menor magnitud) y el primer lavado (la primera escorrentía “first flush”) de los eventos extremos.

**b. Volumen de almacenamiento. Protección a la erosión de los cauces y afluentes aguas abajo del sistema de drenaje**

El incremento del caudal pico debido a los desarrollos urbanos ocasiona que los cauces o canales afluentes al sistema de drenaje permanezcan con niveles de lámina de agua altos, contribuyendo con la erosión y ampliación de los cauces.

Con base en esto, el volumen de almacenamiento de las estructuras SUDS corresponde a un evento de escorrentía de entre 5 y 10 años de periodo de retorno y una retención de 24 horas.

**c. Volumen de almacenamiento. Protección de las llanuras de inundación**

El objetivo de proteger las llanuras de inundación es prevenir un aumento en la frecuencia y magnitud de los daños causados por los desbordamientos. Las estructuras SUDS deben retener eventos de escorrentía de frecuencia media.

El volumen de almacenamiento para la proyección de las llanuras debe ser igual a la escorrentía producida para un evento de 25 años de periodo de retorno y una retención máxima de 24 horas.

**d. Volumen de almacenamiento. Eventos extremos**

Los eventos extremos son los menos frecuentes pero de grandes magnitudes. El volumen de almacenamiento para este criterio corresponde a un periodo de retorno de 100 años y una retención máxima de 24 horas.

### 6.1.5.2. **Cálculo de almacenamiento de las estructuras SUDS.**

#### **CIRIA (2)**

De acuerdo con el CIRIA, los criterios de diseño tienen en cuenta la protección de las personas, la seguridad pública y el medio ambiente. Este criterio depende del alcance definido para la protección y se clasifican así:

- Protección de inundación en el sitio.
- Protección de inundación en el sistema de drenaje.
- Protección de inundación de terrenos adyacentes (aguas arriba y abajo del sitio).

Servicios:

- Protección contra la erosión del cauce o del canal afluente

Calidad:

- Calidad del agua

Ecología

#### **a. Volumen de almacenamiento. Calidad del agua**

El Ciria presenta los siguientes dos métodos para calcular el volumen de almacenamiento requerido de calidad del agua:

- Método de precipitación variable (Variable rainfall depth method). Se basa en una fórmula empírica desarrollada para Escocia, en función del grado de impermeabilidad de la cuenca, del uso del suelo y de la altura de precipitación correspondiente al 90% de las precipitaciones medias anuales. Con base en los parámetros empleados, el volumen de calidad oscila entre 10 y 20 mm de escorrentía distribuidos sobre la cuenca.

$$V_t = 9 * D * \left[ \frac{SOIL}{2} + \left( 1 - \frac{SOIL}{s} \right) * I \right] \quad (6.3)$$

Donde:

$V_t$  = volumen de calidad  $\left( \frac{m^3}{ha} \right)$

SOIL= Parámetro de uso del suelo, obtenido del “Flood Studies Report”, “The Wallingford Procedure” y “The Wallingford Procedure for Europe”.

I= fracción de la cuenca impermeable

D= volumen para un periodo de retorno de 5 años y un tiempo de retención de 60 minutos ( $m^3$ )

- Método de precipitación fija (Fixed rainfall depth method). Se utiliza en Inglaterra y Gales. Se trata de un método más sencillo, puesto que considera una altura de precipitación fija, basada en la experiencia del método anterior. Los valores típicos de precipitación varían entre 11 y 15 mm. Para obtener el volumen de almacenamiento de calidad basta con aplicar la precipitación únicamente en las zonas impermeables de la cuenca.

#### 6.1.5.3. ***Cálculo de almacenamiento de las estructuras SUDS.***

##### ***Tesis de la Universidad Politécnica de Valencia (14)***

A continuación se presentan los métodos para calcular el volumen de almacenamiento de las estructuras SUDS presentados en la tesis de la Universidad Politécnica de Valencia (14), de acuerdo con la USEPA.

- Método simplificado (The Short Cut Method).
- Método hidrológico de pequeñas tormentas (Small Storm Hydrology Method).

Ambos métodos son función de un coeficiente volumétrico de escorrentía ( $R_v$ ) y del volumen de precipitación que cae en la cuenca. Se aplican a cuencas urbanas de hasta 40 o 50 hectáreas, con un alto grado de impermeabilidad.

##### ***Método simplificado***

Corresponde al método utilizado por el manual del estado de Georgia, que se presentó en el numeral 6.1.5.1.

### *Método hidrológico de pequeñas tormentas*

El volumen de calidad del agua se obtiene del mismo modo que en el método simplificado, mediante la ecuación 6.1.3, pero con la diferencia de que se estima el coeficiente volumétrico de escorrentía (Rv).

En este método, Rv se obtiene a partir de los trabajos de Pitt et al. (1994), los cuales consisten en estimar este parámetro en función de los porcentajes de permeabilidad e impermeabilidad de la cuenca, de la precipitación de la lluvia empleada para estimar el volumen de calidad del agua y del uso del suelo.

En la tabla 6.4 se presentan los valores de coeficiente volumétrico de escorrentía obtenidos, representados en función del tipo de suelo y de la altura total de precipitación.

Según Pitt et al. (1994), la desconexión de zonas impermeables en cuencas urbanas puede reducir notablemente la escorrentía generada. En este caso, se adoptan unos factores de reducción sobre el coeficiente volumétrico de escorrentía (Rv), en función del tipo de uso del que se desconectan las zonas impermeables y de la altura total de precipitación.

**Tabla 6.4 Valores de coeficiente volumétrico Rv**

Usos	Precipitación (mm)			
	19,1	25,4	31,8	38,1
Tejados planos y grandes zonas de parqueadero sin pavimentar	0,82	0,84	0,86	0,88
Tejados con pendiente y parqueaderos pavimentados	0,97	0,97	0,98	0,98
Pequeñas zonas impermeables y calles pequeñas	0,66	0,7	0,74	0,77
Suelos arenosos (tipo A1)	0,02	0,02	0,03	0,05
Suelos limosos (tipo B1)	0,11	0,11	0,13	0,15
Suelos arcillosos (tipo C1 y D1)	0,2	0,21	0,22	0,24

Una vez estimado el coeficiente volumétrico de escorrentía y conocida el área de la cuenca, sólo resta definir la precipitación de diseño, para lo cual se utilizan reglas de diseño basadas en porcentajes de la precipitación media anual. Las más utilizadas en los Estados Unidos son las siguientes:

- Regla del 85%. Se trata de la lluvia del percentil del 85% de la serie de eventos del año medio, es decir, la precipitación asociada al suceso cuya altura total es superior a la del 85% de los sucesos correspondientes al año medio.
- Regla del 90%. En este caso, es el percentil 90% de la serie de precipitaciones del año medio. Se aplica en los estados de Nueva York (Nysdec, 2003), Maryland (MDE, 2000) o Vermont (VANR, 2002), cuyas alturas totales de precipitación fluctúan entre 0,7 y 1,3 pulgadas (17,8 y 33 mm) en Nueva York, y entre 0,9 y 1 pulgada (22,8 y 25,4 mm) en Maryland y Vermont (Cedex, 2008).

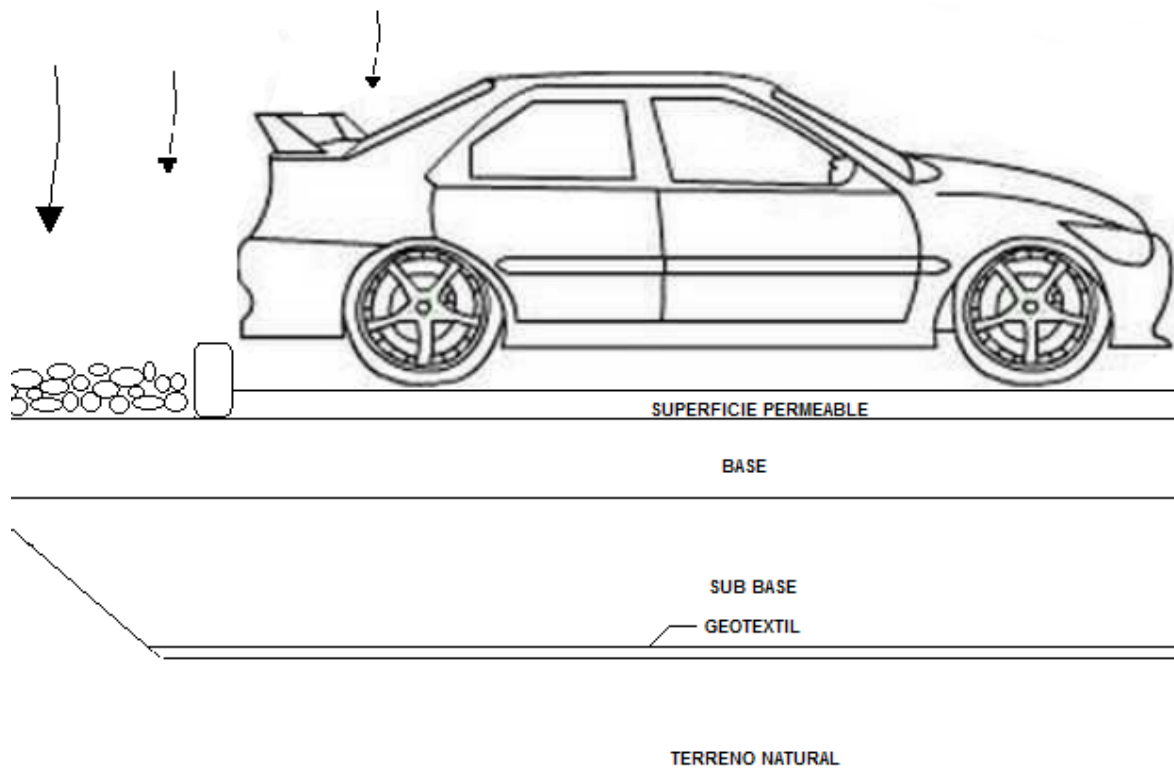
El volumen de almacenamiento de cada estructura depende de su función en el drenaje urbano, pueden almacenar o retener temporalmente los eventos frecuentes o el primer lavado de los eventos extremos, eventos medios y eventos extremos. Por esta razón, el tamaño de las estructuras SUDS está relacionado con el tipo de evento de escorrentía para el cual están diseñadas.

## 6.2. Superficies Permeables

Estas superficies permiten el paso del agua a través de su estructura, para almacenarla durante el evento de escorrentía y luego descargarla controladamente. Estas estructuras contribuyen en la reducción del caudal pico, el volumen y los contaminantes de la escorrentía superficial urbana; además, reducen el área impermeable.

La superficie permeable está compuesta por capas que cumplen una función específica en la estructura, dicha superficie actúa como soporte y permite el paso del agua, la base proporciona tratamiento a través de la filtración y la subbase se encarga del almacenamiento de la escorrentía. En la figura 6.2 y tabla 5.5 se presenta la estructura de

la superficie permeable con los materiales generalmente utilizados y la función de cada una de sus capas.



**Figura 6.2 Superficie permeable. Estructura**

**Tabla 6.5 Estructura para pavimentos permeables**

Elementos de la estructura	Material	Función	Recomendaciones de construcción
<b>SUPERFICIE PERMEABLE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Césped o grava con refuerzos</li> <li>- Adoquines ranurados</li> <li>- Bloques porosos</li> <li>- Mezclas porosas</li> <li>- Concreto poroso</li> </ul>	La superficie permeable permite el paso del agua a través de la estructura. Funciona como primer filtro del agua lluvia y actúa como soporte estructural.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La base de la estructura debe estar perfectamente nivelada (con una pendiente del 0%), para evitar encharcamientos y mala distribución del agua dentro de ella.</li> <li>-Para aumentar la infiltración del agua lluvia en la estructura puede instalarse un borde o sardinel en sus límites, lo cual fomenta el encharcamiento sobre la estructura.</li> </ul>
<b>BASE</b>	Granular	Funciona como soporte para el pavimento. Mejora la calidad del agua lluvia mediante filtración y actividades biológicas.	



**Tabla 6.5 (Continuación) Estructura para pavimentos permeables**

Elementos de la estructura	Material	Función	Recomendaciones de construcción
<b>SUBBASE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Granular</li> <li>- Estructuras de plástico</li> <li>- Geosintéticos</li> </ul>	<p>Actúa como soporte estructural resistiendo las cargas del tráfico. Es el encargado del almacenamiento o transporte de la escorrentía en sus poros.</p>	<p>-La subbase puede estar constituida por agregado limpio, uniformemente clasificado y con un porcentaje de vacíos del 40%. El tamaño del agregado lo define la disponibilidad local, aunque se deben cumplir los requisitos fundamentales del agregado: limpio, clasificación uniforme y alto contenido de vacíos.</p> <p>-La profundidad de la subbase depende de los requisitos de la estructura en almacenamiento de las aguas pluviales, la nivelación del sitio y las necesidades estructurales que requiere el pavimento. Generalmente las profundidades de la subbase oscilan entre 0.2 y 1.0 metros.</p> <p>-Las estructuras de pavimento más permeable corresponden a subbases con agregados; sin embargo, existen otros materiales alternativos que también se pueden utilizar, entre los que se incluyen unidades plásticas con alto potencial de almacenamiento.</p>
<b>GEOTEXTIL</b>	Geosintéticos	<p>El geotextil tiene como función principal la filtración de la escorrentía. Se ubica generalmente entre la base y la subbase y sobre ésta y el terreno natural. En este último proporcionan refuerzo estructural al sistema.</p>	
<b>TERRENO NATURAL</b>	<p>Suelo impermeable</p> <p>Suelo permeable</p>	<p>-Suelo impermeable: la escorrentía es dirigida hacia estructuras aguas abajo del sistema de drenaje pluvial.</p> <p>-Suelo permeable: la escorrentía se infiltra en el suelo bajo la estructura.</p>	

### 6.2.1. Recomendaciones de uso

El uso de las superficies permeables se limita a zonas donde no circulan vehículos pesados, como parqueaderos, calles residenciales, calles de densidad de tráfico medio, cubiertas ajardinadas, aceras, zonas recreacionales, etc. Se recomienda que estén ubicadas alrededor de superficies impermeables para evitar sedimentos que obstruyan la estructura.

Las superficies permeables como el asfalto poroso se deben evitar en lugares de clima cálido, ya que pueden derretirse y destruir los poros de la superficie (15). Adicionalmente,

ayudan a disminuir las altas temperaturas del sitio porque el agua se infiltra rápidamente y reduce su exposición al sol, evitando la evaporación. (EPA)

### **6.2.2. Dimensionamiento (38)**

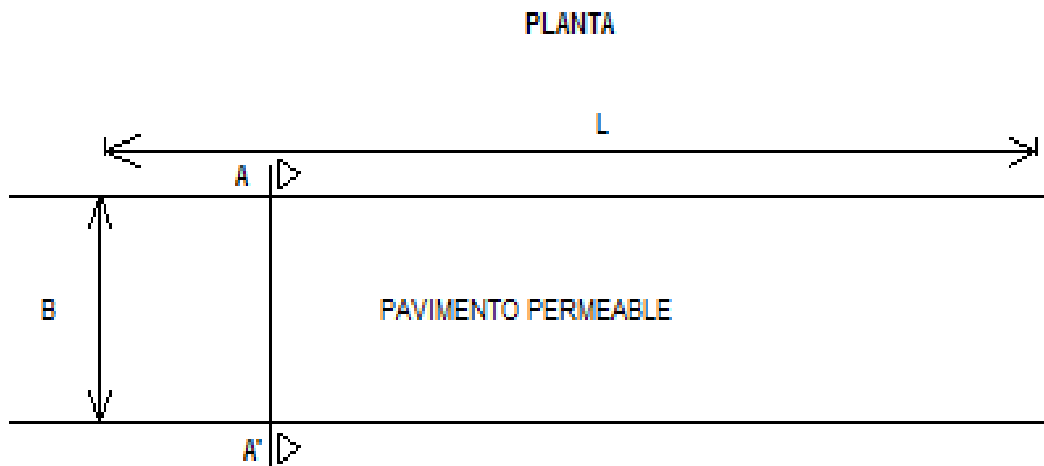
De acuerdo con los criterios de diseño de las estructuras SUDS que se muestran en la figura 6.1, se deben tener en cuenta las características y la hidrología de la cuenca, y la infiltración del suelo. Posteriormente, se calcula el volumen de almacenamiento de la estructura seleccionada.

Por lo general, la superficie permeable se dimensiona para establecer el volumen de almacenamiento de calidad del agua (numeral 6.1.5) u otro volumen de almacenamiento, de acuerdo con la tormenta de diseño.

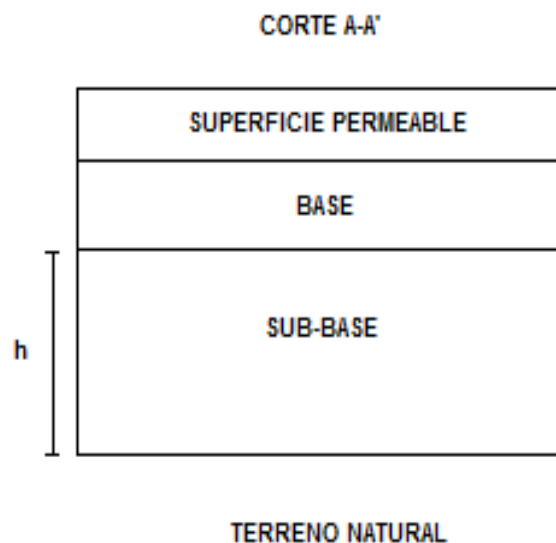
Con base en la bibliografía consultada, el volumen de almacenamiento para las superficies permeables corresponde a un evento frecuente o al primer lavado de eventos extremos, es decir, para periodos de retorno entre 2 ,3 y 5 años, lo cual se define de acuerdo con el área de drenaje de la estructura (ver numeral 3.2.2).

La estructura de la superficie permeable cuenta con la subbase como la capa de almacenamiento de la escorrentía. Para determinar su altura se debe tener en cuenta el área superficial permeable disponible (ver figuras 6.3 y 6.4).

Teniendo en cuenta las características de la ubicación, el espacio disponible y el funcionamiento de la vía, se predimensiona la longitud y el ancho de la superficie permeable y se calcula la profundidad de la subbase, considerando el volumen de almacenamiento y las características de infiltración del sitio.



**Figura 6.3 Dimensionamiento superficie permeable. Planta**



**Figura 6.4 Dimensionamiento superficie permeable. Corte A-A'**

- *Cálculo de la profundidad*

Una vez predeterminados la longitud y el ancho de la vía (L y B), para el calcular la profundidad de la subbase se tienen en cuenta los caudales de diseño del área de drenaje y de la superficie permeable, la infiltración del suelo por un tiempo de retención de dos horas y la relación de vacíos de la capa de almacenamiento. En la ecuación 6.1 se

presenta el cálculo de la lámina de la subbase de la estructura de la superficie permeable para el volumen de almacenamiento.

$$h = \frac{(h_c * R) + P_e - \left(\frac{i}{2} * t_f\right)}{n} \quad (6.4)$$

Donde:

$h$ = profundidad de la subbase, capa de almacenamiento (m)

$h_c$ = altura de escorrentía del área de drenaje. Para el volumen de almacenamiento de calidad de agua ( $h_c$ ) = ( $V_t/A_d$ ) ( $m^3/s$ )

$V_t$ = volumen de almacenamiento

$A_d$ = área de drenaje sin incluir el área de la superficie permeable ( $m^2$ )

$R = \frac{A_d}{A_{sup}}$  relación entre el área de drenaje y el área de la superficie permeable

$A_{sup}$ = área de la superficie permeable en planta ( $B*L$ ) ( $m^2$ )

$P_e$ = el 85% de la precipitación promedio anual. Del volumen de almacenamiento de calidad de agua (mm)

$i$ = tasa de infiltración verificada en campo (m/s). Como factor de seguridad únicamente se toma la mitad de capacidad de infiltración del suelo

$t_f$  = tiempo de llenado del suelo circundante, valor típico de 2 horas (s)

$n$ = relación de vacíos para la capa de depósito (generalmente utilizado = 0.4)

La profundidad máxima permisible de la capa de almacenamiento se calcula con la ecuación 6.2:

$$h_{max} = \left( \frac{\frac{i}{2} * t_d}{n} \right) \quad (6.5)$$

Donde:

$h_{max}$ = altura máxima de la capa de almacenamiento de la estructura (m)

$i$  = tasa de infiltración verificada en campo (m/s). Como factor de seguridad únicamente se toma la mitad de capacidad de infiltración del suelo

$n$  = relación de vacíos para la capa de depósito (generalmente se utiliza = 0.4)

$t_d$  = tiempo máximo de drenaje de la capa de almacenamiento, no deber ser menor a 24 ni mayor de 48 horas

Si la profundidad de la capa de almacenamiento es mayor a la del nivel freático, o si la tasa de infiltración del suelo en terreno es menor a 0,0127 m/h o supera la altura máxima de la capa de almacenamiento se debe calcular la profundidad de la capa de almacenamiento considerando el drenaje del agua lluvia a través de tuberías o colectores hacia el sistema de drenaje urbano aguas abajo de la estructura.

Para calcular la tasa de salida de la tubería de drenaje se puede utilizar la ley de Darcy. El coeficiente de permeabilidad de la grava es muy alta, 17.700 pies/día. Sin embargo, la permeabilidad de la capa de almacenamiento de la superficie permeable drena cada vez más lento a medida que el volumen de almacenamiento disminuye, es decir, la carga hidráulica se reduce. Para considerar este parámetro se toma una permeabilidad más conservadora, de 100 pies/día (sistema inglés) o 30,48 m/día.

$$q_u = k * m \quad (6.6)$$

Donde:

$q_u$  = tasa de flujo de salida a través del drenaje (se suponen 6 pulgadas de diámetro) (m/s)

$k$  = conductividad hidráulica para la capa de almacenamiento (se asumen 100 pies/día; 0,00035278 m/s)

$m$  = pendiente del colector de la tubería (m/m)

Una vez se calcule la tasa de flujo a través del drenaje bajo la estructura, se utiliza la ecuación 6.7 para calcular la profundidad de la capa de almacenamiento.

Para el volumen de almacenamiento de calidad de agua, se emplea:

$$h = \frac{(h_c * R) + P_e - \left(\frac{i}{2} * t_f\right) - (q_u * t_f)}{n} \quad (6.7)$$

$h$ = profundidad de la subbase, capa de almacenamiento (m)

$h_c$ = altura de la escorrentía del área de drenaje. Para el volumen de almacenamiento de calidad de agua ( $h_c$ ) = ( $V_t/A_d$ ) ( $m^3/s$ ),

$V_t$ = volumen de almacenamiento

$A_d$ = área de drenaje ( $m^2$ )

$R = \frac{A_d}{A_{sup}}$  relación entre el área de drenaje y el área de la superficie permeable

$A_{sup}$ = área de la superficie permeable en planta ( $B*L$ ) ( $m^2$ )

$P_e$ = el 85% de la precipitación promedio anual. Del volumen de almacenamiento de calidad del agua (mm)

$i$ = tasa de infiltración verificada en campo (m/s). Como factor de seguridad únicamente se toma la mitad de la capacidad de infiltración del suelo

$t_f$  = tiempo de llenado del suelo circundante, valor típico de 2 horas (s)

$n$ = relación de vacíos para la capa de depósito (generalmente se emplea = 0.4)

$q_u$ = tasa de flujo de salida a través del drenaje

La profundidad máxima permisible de la capa de almacenamiento, limitada por el tiempo de drenaje máximo permitido, se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_{max} = \left( \frac{\left(\frac{i}{2} * t_d\right) + (q_u * t_d)}{n} \right) \quad (6.8)$$

Donde:

$h_{max}$ = altura máxima de la capa de almacenamiento de la estructura (m)

$i$ = tasa de infiltración verificada en campo (m/s). Como factor de seguridad únicamente se toma la mitad de la capacidad de infiltración del suelo

$n$ = relación de vacíos para la capa de depósito (generalmente se emplea = 0.4)

$t_d$  = tiempo máximo de drenaje de la capa de almacenamiento, no deber ser menor de 24 ni mayor de 48 horas (s)

$q_u$  = tasa de flujo de salida a través del drenaje

Si la profundidad de la capa de almacenamiento aún es mayor que la altura máxima de la capa se debe implementar un mayor número de drenajes inferiores, aumentando la tasa de flujo de salida del desagüe.

Las hipótesis que se tienen en cuenta para las ecuaciones anteriores son:

- El área de drenaje no debe contener áreas permeables.
- Para propósitos de diseño, la tasa de infiltración del suelo debe ser verificada en campo. Además, se considera un factor de seguridad de 2.
- La relación de vacíos del material de filtración debe ser 0,4.
- El tiempo máximo de drenaje de cada capa de almacenamiento debe ser mayor de 24 horas y menor de 48 horas.

### 6.2.3. Estructura de pavimento

De acuerdo con la referencia, para determinar la estructura de los pavimentos permeables se pueden consultar las siguientes fuentes guía para el diseño:

- VDOT, Guía de diseño de pavimentos de barrio y secundaria caminos en Virginia (2000, edición).
- Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos (1993).
- AASHTO Suplemento de la guía para el diseño de estructuras de pavimentos (1998).

### 6.2.4. Mantenimiento

Las superficies permeables, al igual que las demás captaciones no convencionales, tienen como limitantes la gran inversión inicial y el cuidadoso mantenimiento que requieren para

que la estructura funcione tal y como se diseñó, en comparación con las captaciones convencionales.

Los sedimentos en la escorrentía urbana obligan a un mantenimiento periódico de la estructura para evitar su obstrucción y prolongar su vida útil. En general, las superficies permeables tienen poco éxito en la práctica.

### **6.3. Zanjas (31)**

Son excavaciones poco profundas, llenas de medios porosos que almacenan temporalmente de la escorrentía, se emplean para filtración y transporte de las aguas lluvias o para infiltración en el suelo circundante. Las zanjas reciben el flujo de agua de zonas impermeables adyacentes, pero también se pueden diseñar para recibir aguas desde una fuente puntual. Existen tres tipos de zanjas: de infiltración, de filtración y biofiltros.

#### **6.3.1. Zanjas de infiltración (38)**

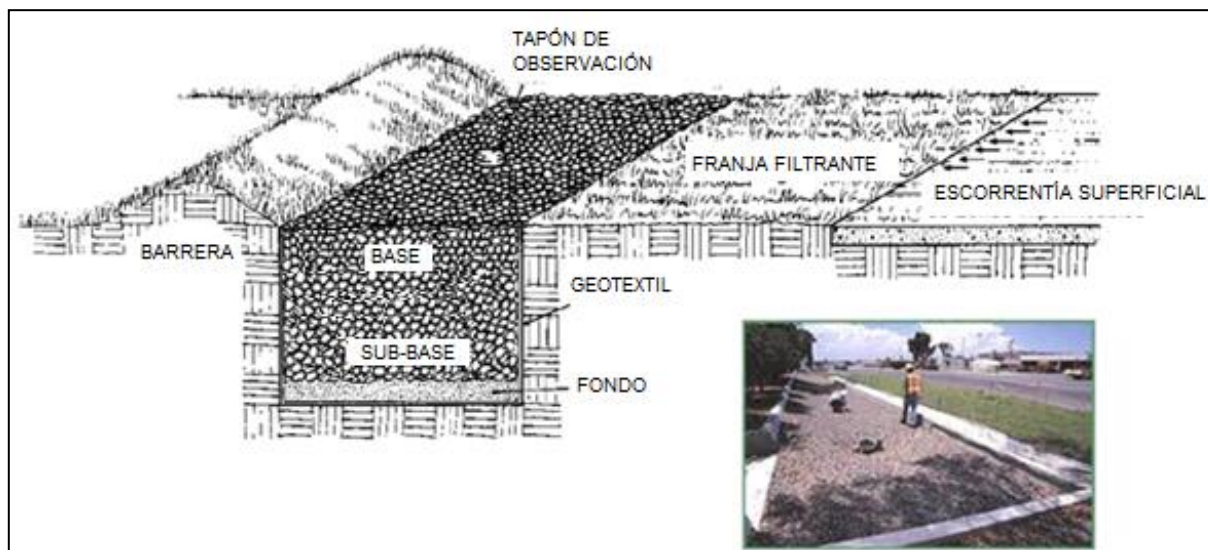
Son estructuras lineales de infiltración subterránea, compuestas de una zanja de material filtrante envuelto en geotextil diseñado para infiltrar y transportar las aguas pluviales, para áreas de drenaje menores de 2 ha.

Estas zanjas tratan el agua de escorrentía urbana mediante la filtración a través del suelo, lo cual reduce el caudal pico y los volúmenes de escorrentía, continuando el ciclo natural del agua en áreas desarrolladas y permitiendo la infiltración del agua en el suelo circundante.

Están compuestas de capas que cumplen una función específica para el tratamiento, almacenamiento e infiltración del agua lluvia. La base permite la filtración de la escorrentía a la estructura, la subbase es la capa encargada del almacenamiento temporal y transporte de la escorrentía, el geotextil funciona como filtro para la



escorrentía y el fondo de la estructura, compuesto regularmente de arena, permite la infiltración de la escorrentía en el suelo. En la figura 6.5 y la tabla 6.6 se presenta la estructura de la zanja de infiltración.



**Figura 6.5 Zanja de infiltración. Estructura (38)**

**Tabla 6.6 Estructura zanja de infiltración. Capas**

Capa	Material	Función	Recomendaciones de construcción
<b>BASE</b>	Relleno granular, como suelo granulado o roca,	Permite la filtración de la escorrentía. No está diseñada para soportar cargas de tráfico	
<b>SUBBASE</b>	Medio poroso, generalmente relleno granular, como suelo granulado o roca; se recomienda agregado uniformemente clasificado, limpio y con al menos 40% de relación de vacíos.	Permite el almacenamiento temporal, transporte y tratamiento de la escorrentía en la estructura.	
<b>GEOTEXIL</b>	Geotextil	Tiene como función la filtración de la escorrentía.	
<b>FONDO</b>	Arena	Permite la infiltración en el suelo.	La pendiente lateral de la zanja debe ser del 0%, mientras que la pendiente longitudinal puede ser hasta del 1%
<b>TERRENO NATURAL</b>	Suelo permeable	El suelo adyacente a la estructura debe ser permeable para que permita la infiltración de la escorrentía. Deben tener tasas de infiltración entre 0,1 y 10 pulgadas por hora (2,54-254 mm/hora).	Cuando la permeabilidad del suelo es muy baja es posible la infiltración. Sin embargo, el área de superficie debe ser más extensa. En suelos carbonatados, donde el drenaje es excesivamente rápido, pueden formarse sumideros en el suelo, por esta razón en estos casos se debe emplear un poco de compactación o tomar medidas para mejorar el suelo.

#### 6.3.1.1. **Recomendaciones de uso**

- La zanja de infiltración es parte del sistema de transporte de drenaje urbano, puede estar situada debajo o dentro de carreteras o áreas impermeables.
- No se recomienda para zonas con pendientes pronunciadas.
- Por lo general, se utilizan junto a superficies impermeables, como parqueaderos o vías.
- Se debe asegurar que las aguas lluvias provenientes de las áreas impermeables no estén contaminadas ni contengan gran cantidad de sedimentos; por lo tanto, se recomienda capturar los sedimentos previa descarga del agua lluvia en la zanja. Por ejemplo, en estacionamientos y vías se deben utilizar franjas filtrantes o captaciones capaces de eliminar aceites, grasas y contaminantes similares antes de la descarga directa al suelo del sitio.
- Cuando el diseño hace parte del sistema de alcantarillado pluvial para el transporte de las aguas lluvias se tiene una tubería continua perforada. De acuerdo con su tamaño la tubería puede proporcionar un volumen de almacenamiento adicional.
- El tratamiento a través de la filtración y la infiltración de la escorrentía tiene una eficaz reducción de sólidos suspendidos totales, metales, aceite y grasa. Pero proporciona un tratamiento limitado de contaminantes disueltos, como los nitratos.

#### 6.3.1.2. **Dimensionamiento (38)**

De acuerdo con el procedimiento de diseño de las estructuras SUDS de la figura 6.1, para su construcción se deben tener cuenta las características de la cuenca, la hidrología del sitio y la infiltración de suelo. El siguiente paso es calcular el volumen de almacenamiento de la estructura seleccionada.

Las zanjas de infiltración proporcionan un excelente medio de captura e infiltración de la escorrentía de eventos frecuentes. De acuerdo con la bibliografía, el volumen de almacenamiento de estas estructuras corresponde a un evento frecuente o el primer

lavado de eventos extremos, es decir, para periodos de retorno entre 2 ,3 y 5 años, el cual se define de acuerdo con el área de drenaje de la estructura (ver numeral 3.2.2).

El volumen de almacenamiento también puede calcularse con el criterio de almacenamiento de calidad de agua descrito en el numeral 6.1.5.

La zanja de infiltración cuenta con una subbase como capa de almacenamiento y transporte de la escorrentía. Una vez definido el volumen de almacenamiento, para determinar la altura de la capa de almacenamiento se debe tener en cuenta el área superficial disponible de la zanja de infiltración (ver figuras 6.3 y 6.4).

Las estructuras de infiltración se utilizan para reducir el volumen de la escorrentía. El potencial de dicha reducción es una función del almacenamiento proporcionado y de la infiltración que se produce.

Si la estructura de infiltración utiliza drenaje a través de una tubería perforada, la capacidad de la tubería debe descontarse del cálculo del volumen, porque no corresponde con el volumen infiltrado o retenido.

- **Cálculo de la profundidad de la subbase (38)**

La primera ecuación utilizada para las prácticas de infiltración establece la profundidad máxima de la capa de almacenamiento para la estructura.

- Profundidad máxima de la capa de almacenamiento

$$h_{max} = \left( \frac{i}{2} * t_d \right) / n \quad (6.9)$$

Donde:

$h_{max}$  = altura máxima de la capa de almacenamiento de la estructura (m)

$i$  = tasa de infiltración verificada en campo (m/s). Como factor de seguridad únicamente se toma la mitad de la capacidad de infiltración del suelo

$n$  = relación de vacíos para la capa de depósito (generalmente se emplea = 0.4)

$t_d$  = tiempo máximo de drenaje de la capa de almacenamiento, entre 1.5 y 2 días.

Una vez conocida la altura de la capa de almacenamiento, se calcula la superficie necesaria para la zanja de infiltración utilizando la siguiente ecuación:

$$A_{supe} = \left( \frac{V_t}{n * h + \left( \frac{i}{2} * t_f \right)} \right) \quad (6.10)$$

Donde:

$A_{sup}$  = área superficial

$V_t$  = volumen de almacenamiento en la subbase

$n$  = relación de vacíos para la capa de depósito (generalmente = 0.4)

$h$  = Altura de infiltración calculada por la ecuación 6.6

$i$  = tasa de infiltración verificada en campo (m/s). Como factor de seguridad únicamente se toma la mitad de la capacidad de infiltración del suelo

$t_f$  = tiempo máximo de llenado del suelo de infiltración (valor típico dos horas o 0.083 días)

### 6.3.1.3. **Mantenimiento (38)**

El mantenimiento es fundamental para garantizar el rendimiento a largo plazo de la estructura de captación, porque la obstrucción del material de relleno granular es el problema más frecuente que se registra en estas estructuras. Para evitar al mínimo esta obstrucción se sugiere adoptar las siguientes características:

Pozos de observación. Se deben incluir pozos de observación, que consisten en tuberías verticales perforadas en PVC de 6" de diámetro, ancladas y con tapones sellados que faciliten la inspección y el mantenimiento.

Geotextil. Evitar la instalación de geotextil en la parte inferior de la estructura de infiltración. La experiencia ha demostrado que este material es propenso a la obstrucción, un sustituto más eficaz es una capa gruesa de piedra lavada (Choker Stone). Sin embargo, el geotextil se debe instalar en las paredes de la estructura para evitar el arrastre de finos.

Para diseñar las zanjas se debe tener en cuenta que estas estructuras no deben depender por completo de la infiltración para todos los eventos de lluvia. Por esta razón, se cuenta con un sistema de drenaje que permita la descarga controlada de los eventos extremos de precipitación.

### **6.3.2. Filtración (38)**

Las zanjas de filtración se utilizan cuando los suelos circundantes son impermeables o donde la contaminación no permite la infiltración del agua lluvia al agua subterránea. Estas zanjas proporcionan una zona de sedimentación para eliminar los sedimentos finos, fomentar la filtración y los procesos de biodegradación.

Por ser estructuras de transporte del agua lluvia, las zanjas de filtración podrían remplazar las tuberías (sistemas de transporte convencionales). Sin embargo, requieren un mantenimiento constante para evitar la obstrucción de los filtros, razón por la cual se deben considerarse como un complemento (ver la figura 6.6).

La zanja de filtración está compuesta por una serie de pretratamientos para evitar la obstrucción de la estructura, en la figura 6.7 se presenta una cámara de sedimentación que precede el ingreso de la escorrentía a la estructura de filtración.

Estas estructuras cuentan con una serie de capas con funciones específicas: la capa de pondaje o almacenamiento temporal que proporciona una retención previa a su filtración; el filtro, generalmente compuesto de arena y gravilla, se encarga de la filtración, proceso que mejora la calidad del agua de escorrentía; el geotextil facilita la filtración de la escorrentía y un subdrenaje compuesto de una tubería perforada que transporta el agua de escorrentía filtrada hacia otras estructuras que componen el sistema de drenaje urbano aguas abajo. (Ver tabla 6.7)



**Figura 6.6 Zanja de filtración perimetral. (38)**

#### 6.3.2.1. **Recomendaciones de uso**

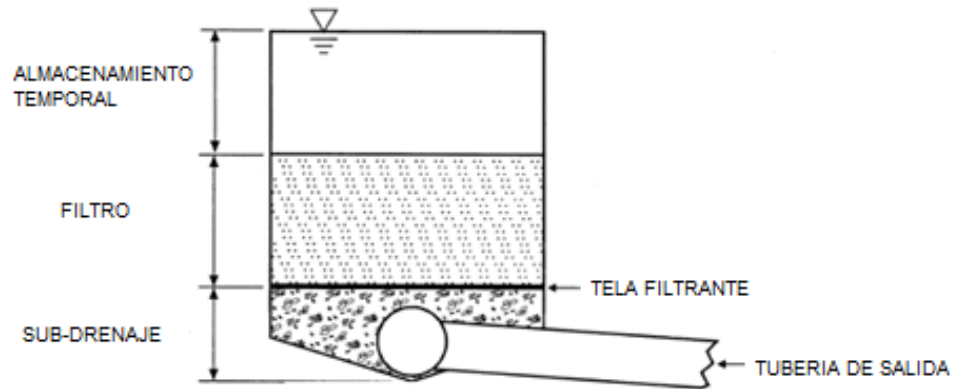
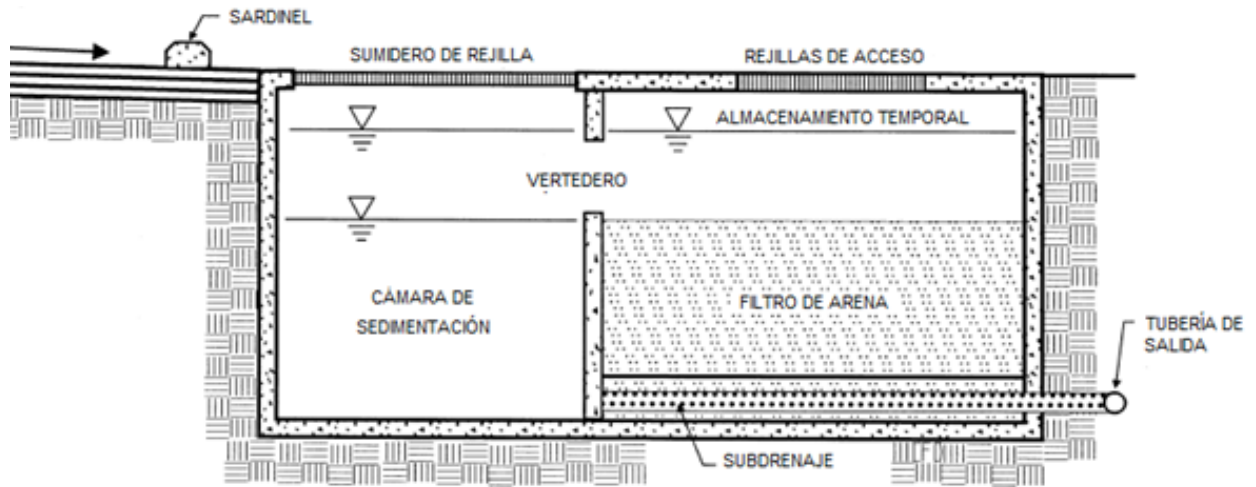
Los filtros se pueden aplicar a la mayoría de tipos de suelo urbano, lo cual no siempre es rentable, debido a su alto costo unitario y a las pequeñas áreas de drenaje para las que se diseñan, pero existen situaciones o lugares donde pueden llegar a ser una buena opción, como en pequeños parqueaderos con tráfico medio, donde las cargas de sedimentos sean bajas.

A continuación se presentan algunas restricciones de diseño para las estructuras de filtración:

- Profundidad con el nivel freático. El diseñador debe asegurar una distancia de separación de al menos 0.6 m entre la base de la estructura y el agua subterránea.
- Área de drenaje. Las zanjas de infiltración son aplicables a sitios pequeños, donde el área de drenaje en lo posible sea impermeable para minimizar la carga de sedimentos al filtro. Para filtros de arena se recomienda un área de drenaje máxima de 2 ha. Los filtros se pueden utilizar para áreas mayores; sin embargo, la carga de sedimentos es mayor y se aumentan los costos de mantenimiento.
- Manejo de excesos. Todos los filtros deben estar diseñados de manera que los eventos de escorrentía más grandes se puedan evacuar de la estructura a través de sistemas de drenaje para eventos extremos.
- Velocidad del agua. El agua debe distribuirse uniformemente a través de la superficie del filtro durante el evento de escorrentía, controlando la velocidad para evitar erosionar el material del filtro.
- Pretratamiento. Las áreas contiguas al filtro deben tener cubierta vegetal o de otro tipo para evitar la entrada excesiva de sedimentos que obstruyan el filtro y reduzcan su funcionamiento.
- El pretratamiento del agua lluvia a través de estructuras como las franjas filtrantes ayuda a retener sedimentos y a reducir la velocidad del flujo previo el ingreso al filtro.
- Medio filtrante. Este medio puede estar compuesto de gran variedad de materiales (arena, turba, gravilla, etc.), en la mayoría de los casos deben tener una profundidad mínima de 18" (0,46 m) y máxima de 30" (0,91 m).

Los materiales gruesos permiten mayor conductividad hidráulica, pero se requiere un medio fino para filtrar las partículas más pequeñas. La arena es proporcional entre un medio fino y uno grueso, pero se necesitan diversos tipos de medio para eliminar los contaminantes.

Dependiendo las características de la escorrentía de las aguas lluvias, se determina una combinación de materiales de filtro para lograr mejores resultados. Además de establecer el grado de filtración y el tamaño de la partícula se determina el tiempo de viaje en el filtro.



SECCIÓN TÍPICA

Flujo laminar zona impermeable

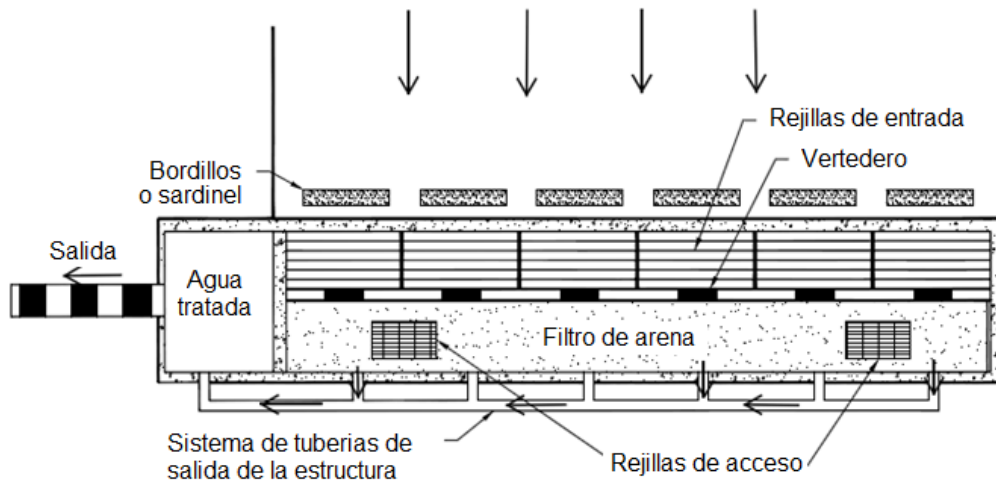


Figura 6.7 Zanja de filtración. (38)



**Tabla 6.7 Capas de la estructura de la zanja de filtración**

Capa	Material	Función	Recomendaciones de construcción
ALMACENAMIENTO TEMPORAL O PONDAJE		Proporciona almacenamiento temporal de la escorrentía, previo a su filtración.	
FILTRO	Arena Gravilla	Permite la filtración de la escorrentía mejorando su calidad.	En la mayoría de los casos deben tener una profundidad mínima de 18" (0,46 m) y máxima de 30" (0,91 m). Los materiales gruesos permiten mayor conductividad hidráulica, pero es necesario un medio fino para filtrar las partículas más pequeñas. La arena es proporcional entre un medio fino y uno grueso, pero se requieren diferentes tipos de medio para eliminar los diferentes contaminantes.
TELA FILTRANTE	Geotextil	Facilita la filtración de la escorrentía.	
SUBDRENAJE	Tubería en PVC cubierta de grava.	La tubería perforada rodeada de grava recoge la escorrentía filtrada a través de las capas para transportarla a estructuras de drenaje aguas abajo.	El diámetro de las tuberías de drenaje debe ser mínimo de 4", con una separación lateral de no más de 3 metros.

### 6.3.2.2. Dimensionamiento (31)

Las zanjas filtrantes están diseñadas para almacenar un volumen específico, el cual se calcula con base en la profundidad del almacenamiento sobre el filtro (capa de almacenamiento temporal o pondaje) y el área de superficie. El área de la superficie del filtro se puede estimar inicialmente utilizando la ley de Darcy.

Ley de Darcy:

$$Q = k * A_s * \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (6.11)$$

$$V = k * A_s * \frac{\Delta h}{\Delta L} * t_d \quad (6.12)$$

$$A_s = \frac{V * \Delta L}{k * \Delta h * t} \quad (6.13)$$

Con lo cual el área superficial para la estructura se calcula así:

$$A_{supe} = \frac{V_t * h}{k * (h_f + h) * t_d} \quad (6.14)$$

Donde:

$A_{supe}$  = superficie del filtro

$V_t$  = volumen de tratamiento del agua

$h$  = profundidad del filtro medio filtrante. Mínimo 1 pie (0,30 m) (subbase capa de almacenamiento)

$t_d$  = tiempo máximo de retención en la capa de almacenamiento (no puede exceder los 1,67 días)

$h_f$  = altura de almacenamiento sobre la cama del filtro. Con un máximo de 5 pies (1,5 m)

$k$  = coeficiente de permeabilidad. Arena parcialmente obstruida 3.5 pies/día (1,07 m/día)

Para prevenir la infiltración en el suelo se debe impermeabilizar la base de la estructura, y a través de una tubería recolectar el agua almacenada temporalmente y transportarla aguas abajo del sistema de drenaje pluvial urbano.

### 6.3.2.3. **Mantenimiento**

Con el fin de prolongar la vida útil de la estructura de filtración desde la etapa de diseño es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos en el mantenimiento para evitar inconvenientes futuros.

- Pozos de observación y limpieza. Estos pozos consisten en tuberías verticales perforadas en PVC de 6" de diámetro, ancladas y con tapones sellados para facilitar la inspección y el mantenimiento.

- Acceso. Los filtros se deben diseñar con suficiente acceso para posibilitar el mantenimiento.
- Visibilidad. Los filtros deben ser claramente visibles para que el personal de mantenimiento los encuentre fácilmente. Los puntos de acceso a los filtros se deben identificar con marcas adecuadas.

### 6.3.3. Biofiltros (38) (31)

Los biofiltros constituyen zanjas con cubierta vegetal, también denominadas de biorretención o jardines de lluvia. Este último término se refiere a estructuras de biofiltro que se encuentran, por lo general, en propiedades residenciales.



**Figura 6.8 Zanjas vegetadas. Biorretención (38) (31)**

La función de estas estructuras es captar el agua lluvia, permitiendo que se infiltre y almacenándola temporalmente mientras elimina los contaminantes. Si las condiciones del suelo lo permiten, la escorrentía se infiltra, si no es así retorna al sistema de transporte de agua lluvias luego del evento de escorrentía. Un beneficio adicional de las zanjas vegetadas es que parte del agua lluvia captada se elimina a través de la evaporación y la transpiración de las plantas.

De acuerdo con lo anterior, los biofiltros son estructuras de captación que reducen el volumen de la escorrentía, el caudal pico y eliminan los contaminantes del agua lluvia. Los biofiltros se pueden convertir en una característica atractiva del paisajismo.

El diseño de las estructuras de biorretención es amplio, varía desde pequeños jardines de lluvia en los antejardines hasta áreas de alta ingeniería en zonas urbanas. Su estructura está compuesta por capas definidas, como se muestra en la figura 6.9 y la tabla 6.8.

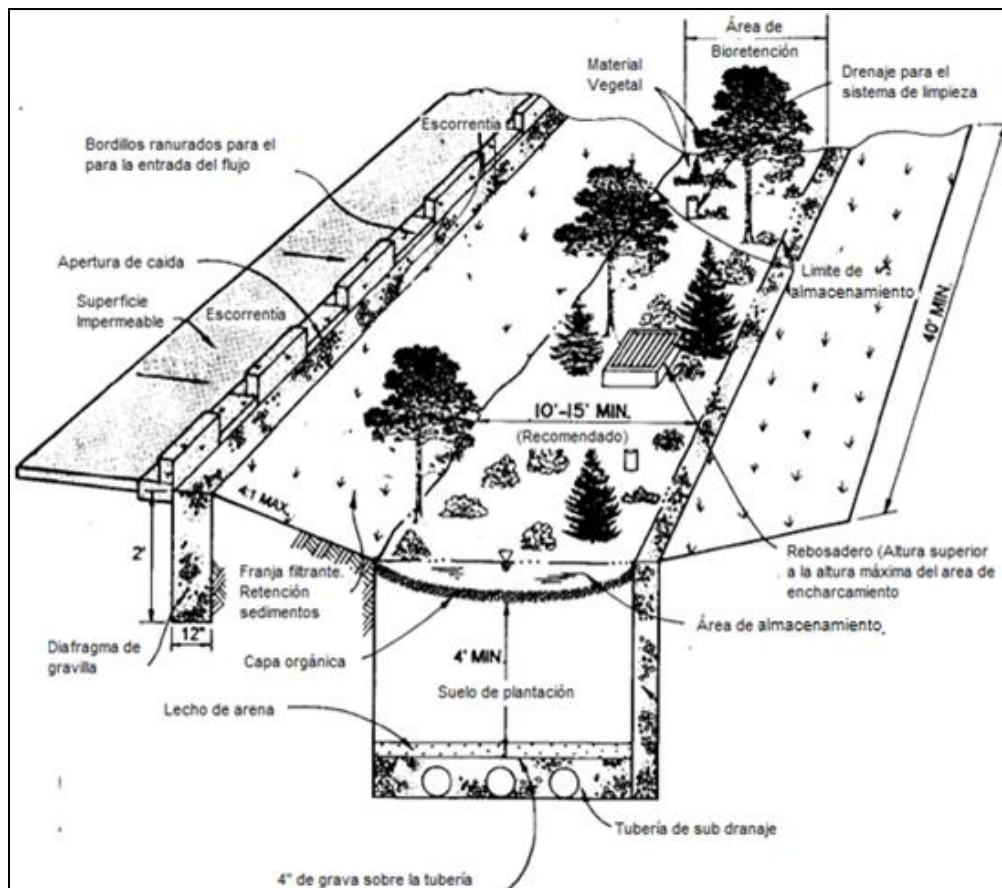
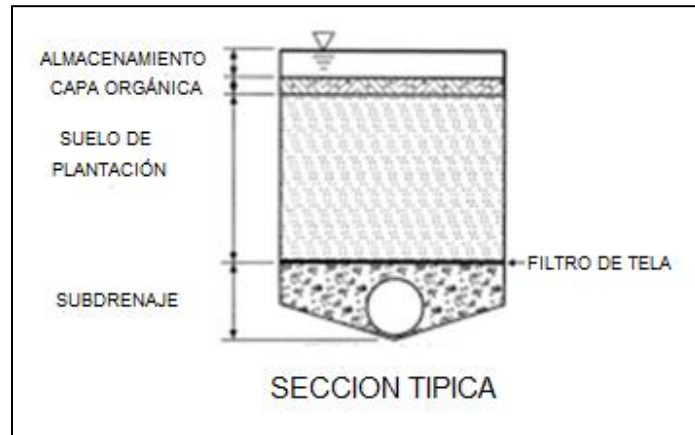


Figura 6.9 Esquema de zanja vegetal (biofiltro) (38) (31)

**Tabla 6.8 Zanja vegetal (biofiltro). Capas de la estructura**

Capa	Material	Función	Recomendaciones de construcción
<b>PRETRATAMIENTO</b>	Remoción de sedimentos a través de una franja de amortiguamiento con vegetación.	Reduce la velocidad y los sedimentos de la escorrentía.	
<b>ÁREA DE ALMACENAMIENTO O PONDAJE (PONDING AREA)</b>		Proporciona almacenamiento temporal de la escorrentía previo a su captación, evaporación o infiltración. Además, provee una capacidad adicional de sedimentación.	La profundidad de encharcamiento superficial recomendada es de 6" (0,15 m). Se pueden utilizar hasta de 18" (0,46 m), si las plantas seleccionadas pueden soportar este nivel de encharcamiento. El tiempo de vaciado debe estar entre 24 y 48 horas.
<b>PLANTAS</b>	Plantas recomendadas* (Anexo)	El desarrollo de raíces facilita la infiltración de la escorrentía y mejora la estética del suelo.	
<b>CAPA ORGÁNICA</b>	Abono	Proporciona la filtración de contaminantes de la escorrentía. Protege el suelo de sequía y de erosión. Proporciona un lugar para el crecimiento de microorganismos que degradan la materia orgánica. Provee un medio de crecimiento biológico para la descomposición de material orgánico, absorción y fijaciones de metales pesados.	
<b>SUELO DE PLANTACIÓN O DE SIEMBRA</b>	Arcilla	Provee los nutrientes para las plantas. Actúa como sistema de filtración, contribuyendo con la calidad de la escorrentía; además, provee el almacenamiento del agua lluvia en los poros del suelo.	
<b>SUBDRENAJE</b>	PVC	El subdrenaje consiste en una tubería perforada, rodeada de grava, que recoge la escorrentía filtrada a través de las capas de la estructura. Los biofiltros también pueden diseñarse para infiltración en el suelo adyacente.	

### 6.3.3.1. **Recomendaciones de uso**

Las estructuras de biorretención se pueden utilizar en muchos lugares, desde pequeñas áreas, destinadas a zonas residenciales, hasta espacios extensos como estacionamientos incorporados en los separadores o áreas perimetrales.

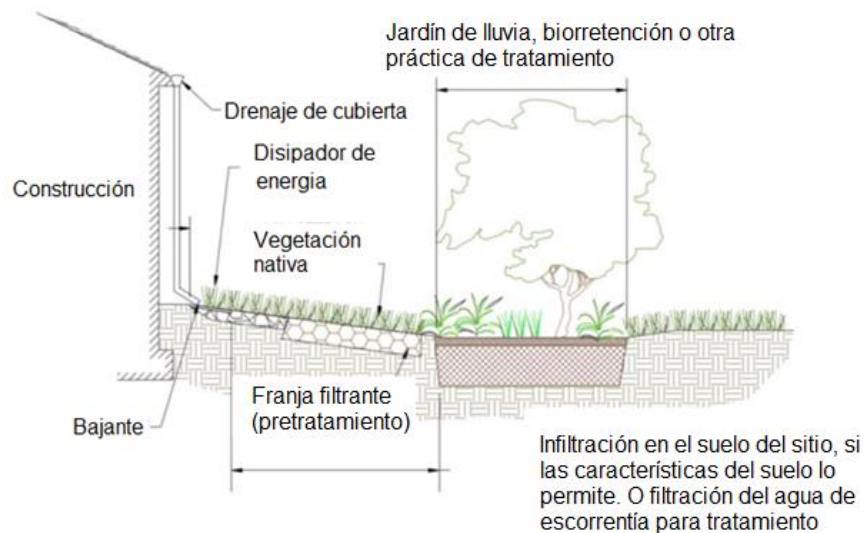
Los biofiltros se pueden localizar para el drenaje de techos y terrazas, así como en áreas altamente impermeables como estacionamientos y vías. Si se diseñan adecuadamente

tienen las mismas características de un bosque denso, empleando ciertas plantas y suelos ricos en nutrientes. Adicionalmente, tienen un alto valor estético.

Teniendo en cuenta que las estructuras de biorretención están conformadas por filtros de arena no se recomiendan en zonas donde los eventos de escorrentía sean frecuentes, pues el filtro no tiene el tiempo suficiente para para secarse y airear. Para utilizar biofiltros en un sitio desarrollado es necesario establecer el alcance del área drenada por la estructura en el sitio. En este sentido, los biofiltros se clasifican así:

- Microbiorretención o jardines de lluvia

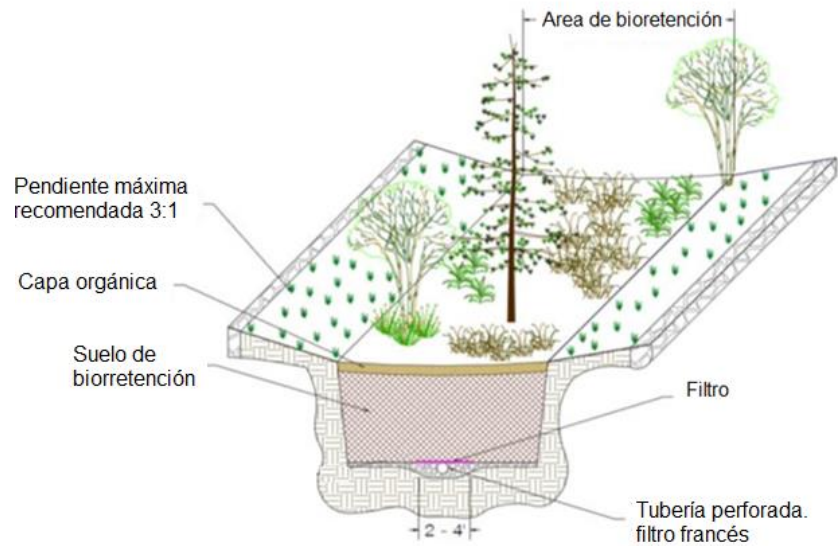
Son estructuras diseñadas para tratar la escorrentía aferente a áreas pequeñas, como por ejemplo cubiertas individuales, caminos y zonas de desarrollos residenciales (figura 6.10).



**Figura 6.10 Jardín de lluvia. (38)**

- Cuencas de biorretención

Son estructuras que tratan áreas de drenaje como parqueaderos, estacionamientos y tejados comerciales o industriales. Se pueden utilizar en zonas residenciales, en las áreas comunes o servidumbres, para tratar un mayor volumen de escorrentía (figura 6.11).



**Figura 6.11 Cuenca de bioretención. (38)**

- Pequeños jardines de aguas lluvias

También se conocen como filtros con vegetación. Estas estructuras aprovechan el espacio disponible para el tratamiento de las aguas lluvias. Se utilizan como filtros en zonas con jardines entre los edificios y carreteras.



**Figura 6.12 Jardines de aguas lluvias. (38)**

- *Área extendida de árboles urbanos*

Se ubican en la zona del andén, cerca de la calle urbana, donde normalmente están los árboles. El volumen del suelo requerido para la implantación de los árboles se incrementa para contribuir a la retención de la escorrentía. El tratamiento aumenta mediante el uso de series de áreas de plantación de árboles conectados en fila. El área de la superficie de la plantación puede ser con rejillas, pavimentos permeables o pavimentos convencionales. El amplio espacio de enraizamiento y el suministro confiable de agua aumenta el crecimiento y la tasa de supervivencia de la vegetación.



**Figura 6.13 Área extendida de árboles urbanos. (38)**

En general, la biorretención urbana tiene las mismas limitaciones que la regular, además de las siguientes restricciones:

Área de drenaje. El área de drenaje de estos entornos suele ser 100% impermeable, limitada a una extensión de 235 m<sup>2</sup> para cada unidad cuando se utilice una profundidad



mínima del suelo de 0,5 m. Se pueden instalar varias unidades frente a un edificio o estacionamiento para aumentar el área de tratamiento de la escorrentía superficial.

Drenaje. En lo posible se deben reconectar las aguas de escorrentía al sistema de drenaje urbano y evitar la infiltración en el suelo.

Minimizar los impactos externos. Debido a que estas estructuras se instalan en entornos altamente urbanos, las unidades están expuestas a una mayor visibilidad pública, a mayores cargas de basura, al tráfico peatonal, el vandalismo e, incluso, a cargas vehiculares. En estos proyectos los diseñadores deben contemplar, o al menos minimizar, tales impactos. Además, deben reconocer claramente la necesidad de realizar frecuentes tareas de mantenimiento de jardinería para eliminar la basura, verificar si hay obstrucción y mantener la vegetación en buen estado.

Cuando se utilice biorretención en los andenes, los diseñadores deben facilitar el tráfico de los peatones sin crear peligro para su seguridad. Además, pueden instalar rejillas u otras medidas para prevenir los daños causados por éstos.

#### 6.3.3.2. ***Dimensionamiento (10)***

La superficie de la estructura de biorretención depende de los requerimientos del volumen de almacenamiento, pero por lo general no debe exceder una relación de carga de 5:1 entre el área de drenaje impermeable y la zona de biorretención máxima. Se debe tener en cuenta toda el área de drenaje no solo la parte impermeable.

El área superficial de biorretención se determina tomando el volumen de almacenamiento, la profundidad máxima de encharcamiento en la superficie de la estructura, la relación de carga y el tiempo de vaciado. La infiltración y la evapotranspiración se incrementan al aumentar el área superficial de la zona de biorretención. El área de encharcamiento debe proporcionar suficiente espacio para cubrir el volumen de almacenamiento necesario sin sobrepasar la profundidad de encharcamiento diseño.

Al momento de diseñar un área de biorretención se recomienda tener en cuenta los siguientes pasos:

1. Definir el tamaño inicial de la zona de biorretención sobre la base de los principios de la ley de Darcy.
2. Verificar que se cumpla la relación de carga y el volumen requerido de almacenamiento.

El tamaño inicial de las áreas de biorretención se puede definir sobre la base de los principios de la ley de Darcy (ver numeral 6.3.2.2) de la siguiente manera:

Filtración:

$$A_{supe} = \frac{V_t * d_f}{[k * (h_f + d_f) * t_d]} \quad (6.15)$$

Infiltración

$$A_{supe} = \frac{V * d_f}{[i * (h_f + d_f) * t_d]} \quad (6.16)$$

Donde:

$A_{supe}$  = área superficial del lecho filtrante

$V$  = volumen de calidad de agua o volumen requerido ( $m^3$ )

$d_f$  = profundidad del filtro de la estructura (m), mínimo 4 pies (1,22 m) (39)

$k$  = coeficiente de permeabilidad de filtro (m/día)

$i$  = tasa de infiltración de los suelos subyacentes (m/día)

$h_f$  = altura media de agua por encima del lecho filtrante (m), típicamente de 3 pulgadas (7,62 cm), que es la mitad de la profundidad de encharcamiento (6 pulgadas) (39)

$t_d$  = tiempo de drenaje del lecho filtrante (días) (tiempo máximo 48 horas)

- Cálculo del volumen de almacenamiento total

La estructura de biorretención puede estar compuesta de los siguientes volúmenes: el de almacenamiento superficial, el de almacenamiento del suelo y el del lecho de infiltración. Estos tres componentes se deben calcular por separado y el volumen de almacenamiento total resulta de la sumatoria.

$$V_{TR} = V_{asu} + V_s + V_{inf} \quad (6.17)$$

Donde:

$V_{TR}$  = volumen total reducido

$V_{asu}$  = volumen de almacenamiento superficial

$$V_{asu} = A_{zona\ de\ encharcamiento} * h_f$$

$A_{zona\ de\ encharcamiento}$  = área de la zona de encharcamiento

$h_f$  = profundidad de la lámina de agua máxima en la superficie

$V_s$  = volumen subsuperficial o almacenamiento del suelo

$$V_s = A_{inf} * Profundidad\ del\ material\ de\ almacenamiento * \eta \quad (6.18)$$

$A_{inf}$  = área de infiltración

$\eta$  = relación de vacíos del material de almacenamiento

$V_{inf}$  = volumen de infiltración del subsuelo

$$V_{inf} = A_{inf} * i * t_f \quad (6.19)$$

$A_{inf}$  = área de infiltración

$i$  = tasa de infiltración del suelo

$t_f$  = tiempo de llenado de la capa de infiltración

El objetivo es que el volumen de almacenamiento total sea mayor que el de almacenamiento requerido (volumen de calidad del agua o el requerido para la tormenta de diseño). Si el volumen total es menor que el requerido, es necesario un nuevo ajuste a la zona de biorretención.

#### 6.3.3.3. **Suelo de plantación**

El suelo de plantación de las estructuras de biorretención debe tener características específicas para su apropiado funcionamiento, como contar con un medio idóneo para las plantas y adsorber los contaminantes en la escorrentía urbana. A continuación se presentan las características físicas del suelo de plantación.

Su profundidad depende del tipo de plantas de siembra en la estructura. Por ejemplo, para especies de plantas herbáceas la profundidad del suelo debe estar entre 18 y 48 pulgadas (0,46 y 1,23 m), si se utilizan árboles o arbustos leñosos, la profundidad media debe aumentar.

Los suelos deben tener un pH entre 5,5 y 6,5 para una mejor adsorción de contaminantes y una buena actividad microbiológica, mantener un contenido de arcilla de menos del 10%, estar libres de sustancias tóxicas y de material vegetal no deseado; además, tener un porcentaje de materia orgánica entre 5 y 10%. Para aumentar la capacidad de retención de agua en el suelo puede añadirse materia orgánica adicional.

#### 6.3.3.4. **Plantas**

Para un diseño eficaz de las áreas de biorretención es importante una apropiada selección de las plantas. La información de las plantas que se pueden utilizar se amplía

en las referencias (39) (38) y (31). Para estas estructuras también se recomiendan incluir arbustos y árboles.

#### 6.3.3.5. **Suelo de infiltración**

Cuando el suelo del sitio es adecuado para la infiltración se recomienda una cama de por lo menos seis pulgadas (0,15 m) de profundidad, construida con grava limpia en una relación de vacío para el almacenamiento de la escorrentía, por lo general, del 40% y envuelta en geotextil.

#### 6.3.3.6. **Mantenimiento**

De acuerdo con la referencia (38), el mantenimiento de los biofiltros debe ser cuidadoso, en especial durante el primer año de servicio, luego se le debe realizar mantenimiento de rutina para su correcto funcionamiento.

El éxito de las estructuras de biorretención depende, en gran medida, del mantenimiento que se les realice, para lo cual se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

##### - **Las operaciones de mantenimiento durante el primer año de servicio**

*Inspecciones.* Durante los primeros seis meses la estructura se debe inspeccionar por lo menos dos veces, después de precipitaciones que excedan la media pulgada (38).

*Siembra puntual.* En las inspecciones se deben revisar las zonas de la estructura en las cuales no exista vegetación, para estabilizarla nuevamente con la siembra.

*Fertilización.* La fertilización in situ es necesaria una sola vez, luego de la construcción de la estructura.

*Riego.* Las estructuras de biorretención requieren riego una vez por semana durante los primeros dos meses, luego depende de las precipitaciones en la zona.

*Retirar las plantas muertas y reemplazarlas.* En el primer año hasta un 10% de las plantas mueren, razón por la cual se deben reemplazar adecuadamente para mantener la vegetación de la biorretención.

- ***Operaciones de mantenimiento de rutina y no rutinarios***

El mantenimiento de las estructuras de biorretención debe incluirse en las rutinas de cuidado de los jardines comunes. Sin embargo, los biofiltros tienen requerimientos especiales, como el nivel de lámina de agua sobre la estructura (pondaje), el abono adecuado para las plantas, los sedimentos, la recolección de basura y el uso limitado de fertilizantes y pesticidas.

Además, cada estructura de biorretención tiene un programa de mantenimiento especial, debido a que varían de tamaño, al tipo de plantas de siembra que poseen, a la ubicación y al tipo de superficie permeable aferente, de lo cual depende el tipo de contaminación de la escorrentía.

Una de las pruebas de mantenimiento que debe realizarse consiste en agua estancada, si el líquido permanece en la superficie durante más de 48 horas después del evento de escorrentía se debe realizar una inspección más cuidadosa para verificar alguna obstrucción en la estructura.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1. Estructuras de Captación de Drenaje Urbano Convencional**

En la etapa de diseño de las estructuras de drenaje urbano convencional se evalúan características como el tipo de vía, la sección transversal, la pendiente transversal y longitudinal y el tipo de superficie. Con estas características se calcula la capacidad máxima de la vía para el transporte de la escorrentía, teniendo en cuenta la seguridad de los vehículos y los peatones; posteriormente, se procede a ubicar las estructuras de captación convencionales (sumideros), que captan rápidamente la escorrentía de la vía para transportarla al sistema de drenaje urbano.

Las estructuras convencionales están diseñadas para captar de manera puntual y en el menor tiempo posible la escorrentía urbana sobre las vías. Sin embargo, actualmente existen nuevos retos respecto al drenaje urbano, porque el acelerado desarrollo de las ciudades impacta negativamente el ciclo del agua, razón por la cual se hace necesario implementar un sistema de drenaje urbano que no sólo capte de manera puntual y eficaz la escorrentía de las vías sino que, además, contemple el tratamiento y la captación espacial de la escorrentía.

De esta manera, se plantea el estudio de captaciones de aguas lluvias mediante estructuras no convencionales, denominadas Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible, SUDS, las cuales están diseñadas para el almacenamiento temporal y el tratamiento de las aguas lluvias a través de la filtración o la infiltración, reduciendo la contaminación y amortiguando el caudal pico.

Las estructuras de captación estudiadas en el presente trabajo no están diseñadas para la captación inmediata de la escorrentía ni para la capacidad máxima de la vía, sino para el almacenamiento temporal y el tratamiento de la escorrentía, removiendo un porcentaje de los contaminantes.

Esto significa que las estructuras convencionales y las no convencionales se podrían complementar, ya que tienen funciones y objetivos diferentes dentro del sistema de drenaje urbano. Mientras las estructuras convencionales drenan rápidamente la escorrentía de la vía, las no convencionales, en cambio, almacenan temporalmente la escorrentía para evacuarla controladamente luego del evento y, además, realizan un tratamiento para eliminar un porcentaje de los contaminantes.

Aunque en algunas ocasiones la palabra “convencional” hace referencia a metodologías obsoletas, de acuerdo con la investigación realizada, en este caso no lo es.

## 7.2. Comparación entre las Estructuras de Captación Convencional y no Convencional SUDS. Procedimiento de Diseño

En el presente trabajo se establecen las condiciones de diseño para los dos tipos de estructuras. En la tabla 7.1 se hace una comparación identificando las siguientes características: la información requerida para el inicio del diseño, los objetivos de diseño: criterios de ubicación, selección y capacidad hidráulica, y finalmente, se presentan las ventajas y desventajas de las captaciones convencionales y no convencionales.

**Tabla 7.1 Comparativo entre las estructuras de captación convencionales y las no convencionales, SUDS**

ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN			
CONVENCIONALES		NO CONVENCIONALES	
<b>*Información requerida para el inicio de los diseños</b>		<b>*Información requerida para el inicio de los diseños</b>	
	- Características de la cuenca		- Características de la cuenca
	- Hidrología del sitio		- Hidrología del sitio
	- Características de la vía		- Estudio de suelos para evaluar el nivel de infiltración



**Tabla 7.1 (Continuación) Comparativo entre las estructuras de captación convencionales y las no convencionales, SUDS**

<b>ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN</b>			
<b>CONVENCIONALES</b>		<b>NO CONVENCIONALES</b>	
<b>*Objetivos del diseño</b>		<b>*Objetivos del diseño</b>	
	Captar puntualmente la escorrentía sobre la vía para transportarla al sistema de drenaje urbano en el menor tiempo posible, teniendo en cuenta la seguridad de las personas y de los vehículos.		Almacenar temporalmente las aguas lluvias y tratarlas a través de la filtración y la infiltración, reduciendo la contaminación y amortiguando el caudal pico hacia las estructuras aguas abajo del drenaje urbano.
<b>DISEÑO</b>		<b>DISEÑO</b>	
<b>*Ubicación de las estructuras de captación</b>		<b>*Ubicación de las estructuras de captación</b>	
	Depende de las características geométricas de la vía.		Depende de las necesidades del sitio, del espacio disponible y del uso de la estructura.
<b>*Selección de la estructura</b>		<b>*Selección de la estructura</b>	
	Depende de las características geométricas de la vía.		Depende la función o uso, el tipo de tratamiento y el espacio disponible.
<b>*Capacidad hidráulica</b>		<b>*Capacidad hidráulica</b>	
	La capacidad hidráulica se calcula teniendo en cuenta la capacidad máxima de la vía para el transporte de la escorrentía, asegurando la seguridad de los vehículos y los peatones.		La capacidad hidráulica de la estructura se calcula teniendo en cuenta del volumen de almacenamiento de la estructura, el cual depende de la función que cumple dentro del sistema de drenaje urbano.

**Tabla 7.1 (Continuació) Comparativo entre las estructuras de captación convencionales y las no convencionales, SUDS**

<b>ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN</b>			
<b>CONVENCIONALES</b>		<b>NO CONVENCIONALES</b>	
<b>VENTAJAS</b>		<b>VENTAJAS</b>	
-	Evacúa en el menor tiempo posible la escorrentía sobre las vías urbanas.	-	La retención temporal de las aguas lluvias disminuye el caudal pico, reduciendo el tamaño de las estructuras aguas abajo del sistema de drenaje urbano.
-	Los requerimientos de mantenimiento son bajos.	-	El tratamiento de las aguas lluvias reduce la contaminación y disminuye las cargas en las escorrentías superficiales.
-	Costos iniciales y de mantenimiento bajos.	-	Como consecuencia del desarrollo urbano, la infiltración en el suelo recarga los acuíferos y contribuye a reducir los efectos en el ciclo del agua.
		-	Tienen aceptación en la comunidad por considerarlos sistemas sostenibles.
<b>DESVENTAJAS</b>		<b>DESVENTAJAS</b>	
-	La captación puntual e inmediata de la escorrentía para transportarla aumenta el tamaño de los colectores y demás elementos del sistema de drenaje aguas abajo.	-	No están diseñadas para la captación inmediata de la escorrentía, es decir, que no se diseñan evaluando la capacidad máxima de la vía.
-	En el diseño no se incluyen el tratamiento ni el aprovechamiento de las aguas lluvias.	-	La infiltración en el suelo tiene limitaciones respecto a la calidad del agua para recargar los acuíferos y la capacidad de infiltración de los suelos.
		-	Los costos iniciales y de mantenimiento son altos.
		-	Requieren suficiente espacio disponible para el almacenamiento del agua lluvia.

### **7.3. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, SUDS. Clasificación**

Para el estudio de las estructuras de captación no convencional de drenaje urbano fue necesario identificar las que conforman los sistemas urbanos de drenaje sostenible, denominados SUDS.

En la bibliografía consultada todas las clasificaciones propuestas son diferentes. Algunas sólo presentan el total de las estructuras que conforman los SUDS sin ninguna clasificación, otras las clasifican por el tipo de tratamiento utilizado y otras más combinan el tipo tratamiento utilizado y la función que cumple la estructura dentro del sistema.

Uno de los objetivos del presente trabajo es proponer un criterio de selección de la estructura de captación adecuada para cada caso. Teniendo en cuenta esto, los SUDS se clasificaron de acuerdo con la función que cumple la estructura en el sistema de drenaje urbano. Por esta razón, la clasificación propuesta simplifica la selección de la estructura de captación, como se presentó en los capítulos 5 y 6.

### **7.4. Recomendaciones para la implementación de los sistemas SUDS en el drenaje urbano**

En el sistema de drenaje urbano implementado para nuestro país el mantenimiento de las estructuras es un tema de especial importancia para las ciudades, ya que en ellas no se práctica el cuidado sino la reparación. Razón por la cual la inclusión de este tipo de sistemas requiere que los diseñadores, los constructores, el personal operativo y la comunidad tomen conciencia de la importancia de implementar este tipo de estructuras de captación para mitigar los efectos producidos por el desarrollo urbano en el ciclo del agua.

Además, la normatividad colombiana respecto a este tipo de estructuras es nula, simplemente sugiere su utilización sin regular el diseño, la construcción y el mantenimiento, lo cual dificulta su implementación.

Las estructuras SUDS requieren inversiones iniciales costosas y un riguroso mantenimiento para prolongar su vida útil; sin embargo, su implementación posibilita que las demás estructuras y procesos aguas abajo del sistema de drenaje se optimicen, debido a la reducción del caudal pico y al tratamiento de las aguas lluvias.

Las estructuras no convencionales son un atractivo en urbanizaciones privadas, si se presentan como proyectos amigables con el medio ambiente, aunque cabe aclarar que los costos iniciales para su implementación son altos, así como su mantenimiento.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. Secretaría Distrital del Ambiente. Subdirección de Ecurbanismo y Gestión Ambiental Empresarial, Segae. Sistemas urbanos de desarrollo sostenible. Documento técnico de soporte SUDS. [En línea] 2011. <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/73754/Sistema+Urbanos+de+Drenaje+Sostenible>.
2. Ciria C697 (2001). *The SUDS manual*. Londres: s.n.
3. Perales Momparler, S. Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS. [En línea] <http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/33S8-P3-Sara%20PeralesACC.pdf>.
4. Gudynas, E. (2004). Ecología, economía y ética del desarrollo sostenible. Una mirada histórica al desarrollo sostenible. 5ª. ed. Coscoroba, Montevideo.
5. Carrasco Oviedo, S.A. (2009). Análisis y propuesta de la gestión institucional de las aguas lluvias urbanas del Gran Santiago. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
6. Eckart, J. (2012). Flexible Urban Drainage Systems in the New-Land Use Areas. South Florida: University of South Florida, Graduate School Theses and Dissertations.
7. Perales Momparler, S. & Andrés-Domenech, I. (2007). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia. *Revista Equipamiento y Servicio Municipales*.
8. Brown, S.A., Strein, S.M. & Warner, J.C. (1996). Urban Drainage Desing Manual, Hydraulic Engineering Circular N°. 22. Washington, DC: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
9. Mays, L.W. (2004). Hydraulic Desing Handbook. Chaper 13 Hydraulic Desing of Drainage of Highways. Kenneth Young, JR Stuart M Stein. s.l. : McGraw-Hill.
10. Instituto Nacional de Vías, Invías (2009). Manual de drenaje de carreteras.
11. Bolinaga, J.J. (1979). Drenaje urbano. Caracas, Venezuela: s.n.
12. Instituto Nacional de Vías, Invías (2008). Manual de diseño geométrico de carreteras.
13. Guo, J.C.Y. (1997). Street Hydraulics and Inlet Sizing. Colorado, USA: *Water Resources Publications, LLC*.

14. Urban Storm Drainage and Flood Control District Denver, Colorado (2001). Urban Storm Drainage Criteria Manual, vol. 1.
15. Formulación del plan maestro para Bogotá D.C. [En línea] [http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx\\_archivos/audio\\_y\\_video/07-InfraestructuraVial.pdf](http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/audio_y_video/07-InfraestructuraVial.pdf).
16. Secretaría de Planeación. Cartilla de andenes. Anexo perfiles viales. [En línea] 2000. [http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/OrdenamientoTerritorial/EspacioPublico/DireccionTallerEspacio%20P%20FABlico/PublicacionesEspacioPublico/CartillaAndenes/dtep\\_5%20Anexo%20Perfiles%20Viales.pdf](http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/OrdenamientoTerritorial/EspacioPublico/DireccionTallerEspacio%20P%20FABlico/PublicacionesEspacioPublico/CartillaAndenes/dtep_5%20Anexo%20Perfiles%20Viales.pdf).
17. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 2000. 2000.
18. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. NS-085 Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado.
19. —. Norma NS-047 Sumideros.
20. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB. NS-057 Cunetas.
21. Empresas Públicas de Medellín (2009). Normas técnicas.
22. Chávez Aguilar, F.J. (2006). Simulación y optimización de un sistema de drenaje urbano. Tesis. Pontificia Universidad Católica del Perú. [En línea].
23. Mays, L.W. Water Resource Engineering.
24. Mays, L.W. (2001). Stormwater Collection Systems Desing Handbook. Chaper 5. Desing of Stormwater inlets. John W. Nicklow, Southern Illinois University Carbondale. s.l. : McGraw-Hill.
25. Instituto Boliviano de Normatización y Calidad (2007). Reglamento técnico de diseño de cunetas y sumideros. [En línea].
26. Guo, J.C.Y. (2006). *Urban Hydrology and hydraulics Desing*. s.l.: Water Resources Publications, LLC.
27. Johnson, F.L. & Chang, F.M. (1984). Drainage of Highway Pavements, Hydraulic Engineering Circular No. 12. Washington, DC.: Federal Highway Administration, US. Department of Transportation.
28. Texas Department of Transportation (2004). Hydraulic Desing Manual.
29. Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción de la Escuela de Caminos y Canales y Puertos de Santander Universidad de Cantabria, Gineco. Sistemas urbanos de drenaje sostenible, SUDS. [En línea]

<http://www.caminospaisvasco.com/Profesion/Publicaciones%20de%20nuestros%20colegiados/suds>.

30. Hernández, J. (2007). Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.

31. Southeast Michigan Council of Governments, SEMCOG (2008). Low Impact Development Manual for Michigan, A Design Guide for Implementers and Reviewers. [En línea]. <http://library.semco.org/InmagicGenie/DocumentFolder/LIDManualWeb.pdf>.

32. The Low Impact Development Center inc (2010). Low Impact Development Manual for Southern California: Technical Guidance and Site Planning Strategies. Carolina Stormwater Quality Association. [En línea]. <http://www.casqa.org/LID/SoCalLID/tabid/218/Default.aspx>.

33. Transport, Roads & Stormwater Directorate (2002). Stormwater Management Planning and Design Guidelines for New Developments. City of Cape Town South Africa. [En línea] [http://www.capetown.gov.za/en/CSRM/Documents/SW\\_Plan\\_Guidelines\\_new\\_develop.pdf](http://www.capetown.gov.za/en/CSRM/Documents/SW_Plan_Guidelines_new_develop.pdf).

34. Tucci, C.E.M. Urban Drainage In Humid Tropics, vol. 1 Unesco. [En línea].

35. Grupo Técnico de Techos Verdes. Santiago de Chile. Recomendaciones técnicas para proyectos de cubiertas vegetales. Proyecto Techos Verdes. Santiago de Chile: s.n.

36. García Haba, E. (2011). Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables aplicación en climas mediterráneos. Universidad Politécnica de Valencia-Recursos Hidráulicos. [En línea]. [http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDkQFjAC&url=http%3A%2F%2Friunet.upv.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10251%2F15383%2FTFM\\_EGH.pdf%3Fsequence%3D1&ei=GazUOjXOKyM0QH3hoCwCA&usg=AFQjCNFhIKxHzvOd149RCXvs58wgjn9\\_jg](http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CDkQFjAC&url=http%3A%2F%2Friunet.upv.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10251%2F15383%2FTFM_EGH.pdf%3Fsequence%3D1&ei=GazUOjXOKyM0QH3hoCwCA&usg=AFQjCNFhIKxHzvOd149RCXvs58wgjn9_jg).

37. AMEC, Earth and Environmental Center for Watershed Protection. Atlanta Regional Commission (2001). Georgia Stormwater Management Manual. Atlanta, Georgia: s.n.

38. Virginia Department of Environmental Quality. *Stormwater Design Specification. Version 2.0*. [En línea] Enero de 2013. [Citado el: 2015 de 2015 de 2015.] [http://www.deq.virginia.gov/fileshare/wps/2013\\_DRAFT\\_BMP\\_Specs/](http://www.deq.virginia.gov/fileshare/wps/2013_DRAFT_BMP_Specs/).

39. Atlanta Regional Commission (2001). Georgia Stormwater Management, vol. 2 *Technical Handbook*.
40. Oviedo, S. (2009). Análisis y propuesta de la gestión institucional de las aguas lluvias urbanas del Gran Santiago. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
41. Icontec (2004). Norma Técnica Colombiana NTC1500. Código Colombiano de Fontanería. Bogotá D.C.
42. Federal Highway Administration. U.S Department of Transportation (2001). Urban Drainage Design Manual. Hydraulic Engineering Circular N°. 22, Second Edition.
43. Rodriguez, Alfonso (2013). Drenaje urbano elementos de diseño. Drenaje urbano no convencional. Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería , 2013.