

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigaciones en Ingeniería
Ambiental CIIA

Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Producto 3 – Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Bogotá D.C., Enero 29 de 2016



acueducto
AGUA, ALCANTARILLADO Y ASEO DE BOGOTÁ



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.



acueducto
AGUA, ALCANTARILLADO Y ASEO DE BOGOTÁ



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	22
-----------------------	----

.....	72
Costos.....	77
Beneficios y limitaciones por tipología.....	86
Herramienta de evaluación y selección de tipologías.....	96
Metodología para la conformación y evaluación del tren de tratamiento	96 4.
DISEÑO HIDROLÓGICO	100
Volumen de tratamiento para el control de calidad de agua	102
Determinación de la profundidad de lámina (h_{WQCV}) a partir de series de escorrentía	103
Determinación de h_{WQCV} a partir de la profundidad de lluvia (h_p).....	104
Determinación de V_c	110
Estimación de la profundidad de lluvia (h_p) para la ciudad de Bogotá.....	111
Caudal de diseño asociado a un periodo de retorno	120 5.
TIPOLOGÍAS DE SUDS.....	122
Cuenca seca de drenaje extendida.....	122 5.1.1.
Descripción.....	122 5.1.2.
Metodología de “Urban Drainage and Flood Control District”, Denver (2010).	125
5.1.3. Metodología de “Riverside County Flood Control and Water Conservation District - Riverside (2011)”	141
5.1.4. Ejemplo de predimensionamiento.....	145 5.2.
Cunetas verdes	151 5.2.1.
Descripción.....	151 5.2.2.
Metodología de “Urban Drainage and Flood Control District”, Denver (2010).	155 5.2.3.
Metodología de “Stormwater management manual”, Western Australia (2007).....	167 5.2.4.
Ejemplo de predimensionamiento.....	179 5.3. Zonas
de bioretención	183 5.3.1.
Descripción.....	183 5.3.2.
Metodología de “Urban Drainage and Flood Control District”, Denver (2010).	187

5.3.3. Metodología de “Riverside county flood Control and Water Conservation District”, Riverside (2011).....	195
5.3.4. Ejemplo de predimensionamiento.....	202 5.4.
Pavimentos porosos.....	206 5.4.1.
Descripción.....	206 5.4.2.
Metodología de “Urban Drainage and Flood Control District”, Denver (2010).	210

5.4.3. Metodología de “Riverside County Flood Control and Water Conservation District”, Riverside (2011).....	219
5.4.4. Ejemplo de predimensionamiento.....	222
Zanja de infiltración	225
Descripción.....	225
5.5.2. Metodología de “Riverside County Flood Control and Water Conservation District”, Riverside (2011).....	229
5.5.3. Metodología de “Virginia Department of Transportation”, Virginia (2013).	235
5.5.4. Ejemplo de predimensionamiento.....	241
Alcorques inundables.....	245
Descripción.....	245
Metodología de “Bioretention”, Delaware (2014).	249
Ejemplo de predimensionamiento.....	256
Tanques de almacenamiento	260
Descripción.....	260
5.7.2. Metodología de “Department of Water - Government of Western Australia” (2007).	264
5.7.3. Ejemplo de predimensionamiento.....	270
ESTRUCTURAS ANEXAS	274
Estructuras para pretratamiento.....	276
Filtros en los sumideros (Catch basin inserts).....	277
complementario.....	278
6.1.3. Separador de aceites.....	281
6.1.4. Trampa de sedimentos / sedimentadores.....	282
6.2. Estructuras de entrada	286
6.2.1. Vado/ Entradas laterales.....	286
6.2.2. Tubería	288
6.3. Estructuras anexas a la estructura de entrada	290
6.3.1. Disipador de energía.....	290
6.3.2. Bypass.....	292
6.3.3. Distribuidor de flujo.....	294
6.4. Estructuras de salida.....	296
6.4.1. Estructura de control del flujo.....	296
6.4.2. Vertedero de excesos.....	302
6.4.3. Vertedero de emergencia.....	302

6.5. Estructuras anexas a la estructura de salida.....	309
6.5.1. Tubería perforada subterránea.....	309
6.5.2. Micropiscina.....	310
6.5.3. Drenaje de mantenimiento.....	310
6.5.4. Rejilla	311
6.5.5. Disipador de energía.....	311
6.6. Estructuras de detención o retención.....	316
6.6.1. Bermas.....	316
6.6.2. Dique de seguridad.....	317
6.7. Estructuras para monitoreo y/o mantenimiento.....	317
6.7.1. Pozos de inspección	317
6.7.2. Tuberías de inspección	317
7. ASPECTOS DE CONSTRUCCIÓN.....	318
7.1 Zonas de bioretención	318 7.1.1
Materiales.....	318 7.1.2
Recomendaciones de construcción.....	320 7.2 Tanques
de almacenamiento	320 7.2.1
Materiales.....	320 7.2.2
Recomendaciones de construcción.....	321 7.3 Alcorques
inundables.....	321 7.3.1
Materiales.....	321 7.3.2
Recomendaciones de construcción.....	322 7.4 Cunetas
verdes	322 7.4.1
Materiales.....	323 7.4.2
Recomendaciones de construcción.....	324 7.5 Cuenca
seca de drenaje extendida.....	324
5	
<p>Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería Investigación de las Tipologías y/o tecnologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.</p>	
7.5.1 Materiales.....	324 7.5.2
Recomendaciones de construcción.....	325 7.6
Pavimentos porosos.....	326 7.6.1
Materiales.....	326 7.6.2
Recomendaciones de construcción.....	329 7.7 Zanjias de
infiltración.....	330 7.7.1
Materiales.....	330 7.7.2
Recomendaciones de construcción.....	331 8.

COBERTURA VEGETAL Y ARBOLADO	333 8.1.
Introducción	333 8.2.
Restricciones de implementación.....	333 8.2.1.
Requerimiento hídrico.....	333 8.2.2.
Requerimientos de humedad	334 8.2.3.
Distancia entre estructuras y coberturas vegetales.....	334 8.3. Cobertura
vegetal en las tipologías SUDS	335 8.3.1. Alcorques
Inundables.....	335 8.3.2. Cuenca Seca de
Drenaje Extendido (CSDE).....	335 8.3.3. Cunetas
Verdes.....	336 8.3.4. Pavimentos
Porosos.....	336 8.3.5. Tanques de
Almacenamiento	336 8.3.6. Zonas de
Bioretención.....	336 8.3.7. Filtros de
Arena.....	336 8.3.8. Humedales
Artificiales.....	337 8.3.9. Pondajes
Húmedos.....	337 8.3.10.
Soakaways.....	337 8.3.11. Zanjás
de Infiltración	337 8.4. Listado de
vegetación aplicable por tipología.....	337 8.4.1. Alcorques
Inundables.....	337 8.4.2. Cuenca Seca de
Drenaje Extendido (CSDE).....	339 8.4.3. Cunetas
Verdes.....	340 8.4.4. Zonas de
Bioretención.....	342 8.4.5. Filtros de
Arena.....	343 8.4.6. Humedales
Artificiales.....	345

8.4.7. Pondajes Húmedos.....	346 8.4.8.
Zanjás de Infiltración	347 9.
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	348 9.1.
Introducción	348 9.2.
Clases de mantenimiento.....	349 9.2.1.
Mantenimiento regular.....	349 9.2.2.
Mantenimiento ocasional	350 9.2.3.
Mantenimiento correctivo	350 9.3. Plan de
Mantenimiento.....	350 9.4. Actividades

generales.....	351 9.4.1.
Inspección.....	352 9.4.2.
Remoción de residuos y escombros	352 9.4.3.
Mantenimiento de arbustos y árboles.....	352 9.4.4.
Mantenimiento de vegetación acuática	353 9.4.5. Control
de plantas invasoras y maleza	353 9.4.6. Manejo de
residuos orgánicos.....	353 9.4.7. Remoción de
sedimentos.....	354 9.4.8. Sustitución de
especies vegetales.....	354 9.4.9. Rehabilitación
estructural.....	354 9.4.10. Rehabilitación de la
superficie infiltrante	354 9.5. Actividades específicas para
las tipologías.....	355 9.5.1. Zonas de
Bioretención.....	355 9.5.2. Cunetas
Verdes.....	357 9.5.3. Cuenca seca de
drenaje extendida	360 9.5.4. Alcorques
inundables.....	362 9.5.5. Tanques de
almacenamiento	364 9.5.6. Zanjias de
infiltración.....	365 9.5.7. Pavimentos
porosos.....	367 9.6. Actividades de
operación y puesta en marcha.....	369 10.
MONITOREO.....	371 10.1.
Diseño de muestreo	372 10.1.1.
Definición objetivos del monitoreo.....	372 10.1.2.
Características del sitio.....	372

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o
 tecnologías de sistemas urbanos de
 drenaje sostenible (SUDS) que más se
 adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

10.1.3. Diseño muestral.....	372
10.2. Procedimiento para la inspección y evaluación de los sitios de muestreo	383 10.3.
Perfil del personal requerido	383
11. CONSIDERACIONES SOCIALES	385
11.1. Introducción	385
11.2. Metodología General.....	385
11.2.1. Etapa previa a la construcción.....	385
11.2.2. Etapa durante la Construcción.....	389
11.2.3. Etapa después de la Construcción	391
11.3. Herramientas de participación.....	395

11.3.1. Encuesta	395
11.3.2. Entrevista.....	395
11.3.3. Cartografía Social.....	395
11.3.4. Taller Informativo	396
11.3.5. Taller Participativo.....	396
11.3.6. Grupo Focal.....	396
11.3.7. Carteles Informativos.....	396
11.3.8. Carteles Formativos.....	396
11.3.9. Jornadas.....	397
12. REFERENCIAS.....	398
ANEXOS.....	408
Glosario.....	408
Listado de normativas de la EAB.....	415
Listado de integrantes del equipo de investigación.....	417

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o
 tecnologías de sistemas urbanos de
 drenaje sostenible (SUDS) que más se
 adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Índice de Tablas

Tabla 1. Información recopilada para el desarrollo del análisis espacial en Bogotá.....	47
Tabla 2. Preselección de tipologías de SUDS de acuerdo con la selección de áreas potenciales	62
Tabla 3. Restricciones presentadas las tipologías propuestas, con respecto a: Pendiente del terreno, Distancia al nivel freático, Tasa de infiltración y Distancia a cimientos.	63
Tabla 4. Restricciones asociadas a geometría del diseño de 4 tipologías propuestas	64
Tabla 5. Criterio de valoración cualitativa.	65
Tabla 6. Calificación tipologías según eficiencia de remoción contaminante	68

Tabla 7. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según eficiencia de remoción de contaminantes.....	69
Tabla 8. Calificación tipologías según eficiencia de reducción de escorrentía.....	70
Tabla 9. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según eficiencia de reducción de escorrentía	70
Tabla 10. Calificación tipologías según contribución a la amenidad.....	71
Tabla 11. Calificación tipologías según conflictos de uso	72
Tabla 12. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según contribución a la amenidad y conflictos de uso.....	72
Tabla 13. Actividades de inspección y mantenimiento cunetas verdes.....	73
Tabla 14. Actividades de inspección y mantenimiento tanques de almacenamiento.....	73
Tabla 15. Actividades de inspección y mantenimiento zonas de bioretención	73
Tabla 16. Actividades de inspección y mantenimiento Alcorques inundables	74
Tabla 17. Actividades de inspección y mantenimiento cuenca seca de drenaje.....	75
Tabla 18. Actividades de inspección y mantenimiento zanjas de Infiltración	75
Tabla 19. Actividades de inspección y mantenimiento Pavimentos porosos.....	76
Tabla 20. Calificación tipologías según frecuencia de mantenimiento.....	76
Tabla 21. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según frecuencia de mantenimiento ...	77
Tabla 22. Costos cualitativos cunetas verdes.....	78
Tabla 23. Costos típicos de tanques de almacenamiento	79
Tabla 24. Costos de Instalación y accesorios Tanques de Almacenamiento	79
Tabla 25. Costos cualitativos tanques de almacenamiento	79
Tabla 26. Costos cualitativos zonas de bioretención.....	80

9

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Tabla 27. Costos cualitativos alcorques inundables.....	81
Tabla 28. Costos cualitativos cuenca seca de drenaje extendida.....	82
Tabla 29. Costos cualitativos zanjas de infiltración.....	83
Tabla 30. Costos cualitativos pavimentos porosos.....	84
Tabla 31. Calificación tipologías según costos.....	84
Tabla 32. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según costos	85
Tabla 33. Beneficios y limitaciones cunetas verdes.....	86
Tabla 34. Beneficios y limitaciones tanques de almacenamiento	87

Tabla 35. Beneficios y limitaciones zonas de bioretención	88
Tabla 36. Beneficios y limitaciones alcorques inundables.....	89
Tabla 37. Beneficios y limitaciones cuenca seca de drenaje extendida	90
Tabla 38. Beneficios y limitaciones zanjas de infiltración.....	91
Tabla 39. Beneficios y limitaciones Pavimentos Porosos.....	92
Tabla 40. Matriz final de selección de tipologías.....	96
Tabla 41. Clasificación de tipologías según su función dentro del tren de tratamiento	97
Tabla 42. Mecanismo de manejo de esorrentía para cada tipología	98
Tabla 43. Matriz de conformación del tren de tratamiento	98
Tabla 44. Matriz de evaluación del tren de tratamiento	99
Tabla 45. Factor de esorrentía para piloto 1	107
Tabla 46. Factor de esorrentía para piloto 2	107
Tabla 47. Valores de CN_i y CN_p para condición II de humedad antecedente	109
Tabla 48. Tipologías SUDS y valores de tiempo de drenaje, a y C	111
Tabla 49. Estaciones de la red de calidad de aire y períodos con disponibilidad de series horarias	112
Tabla 50. Valores del coeficiente de variación para el tiempo entre llegada de tormentas.....	113
Tabla 51. Valores de puntos de inflexión de eventos de tormenta (mm).....	113
Tabla 52. Valores estimados de h_p (mm).....	114
Tabla 53. Valores estimados de h_P (mm) y valores diarios de punto de inflexión y P90	115
Tabla 54. Estimación de h_P para las estaciones disponibles con registro de lluvia diaria	117
Tabla 55. Valores propuestos de h_p para las estaciones disponibles con registro de lluvia diaria..	118

10

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o
 tecnologías de sistemas urbanos de
 drenaje sostenible (SUDS) que más se
 adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Tabla 56. Principales variables requeridas para el diseño hidrológico de la cuenca seca de drenaje extendida	127
Tabla 57. Volumen mínimo de la antecámara según el área impermeable de drenaje.....	131
Tabla 58. Profundidad máxima, caudal de descarga y tipo de estructura recomendados por área impermeable aferente.	131
Tabla 59. Diámetros, n° de columnas y área por fila de orificios de la estructura de salida.....	135
Tabla 60. Profundidad mínima de recarga como función del área impermeable de la cuenca.	136
Tabla 61. Cálculo del ancho mínimo de acuerdo a la forma de los orificios.	138
Tabla 62. Coeficientes y áreas empleadas con método racional.	147

Tabla 63. Principales parámetros de diseño para el dimensionamiento de la cuenca seca de drenaje extendida.	148
Tabla 64. Principales resultados del dimensionamiento de la cuenca seca de drenaje extendida ...	149
Tabla 65. Principales variables requeridas para el diseño hidrológico de la cuneta verde.....	158
Tabla 66. Parámetros asociados al desarrollo de la sección referente a la pendiente longitudinal de la cuneta.	160
Tabla 67. Parámetros asociados a la geometría de la cuneta.....	161
Tabla 68: Variables hidrológicas requeridas para el diseño – Cunetas Verdes.....	170
Tabla 69. Coeficientes, áreas empleadas e intensidades empleadas para definir el caudal de diseño.	181
Tabla 70. Principales parámetros de diseño para el dimensionamiento de la cuneta verde	181
Tabla 71. Principales resultados del dimensionamiento de la cuneta verde.....	182
Tabla 72. Variables hidrológicas requeridas para el diseño – Zanjas de Infiltración.....	190
Tabla 73. Consideraciones técnicas recomendadas - Tubería Perforada.....	194
Tabla 74. Variables hidrológicas requeridas para el diseño – Zanjas de Infiltración.....	196
Tabla 75. Espaciamiento entre diques de 15 cm.	201
Tabla 76. Volumen infiltrado por tipología	204
Tabla 77. Principales parámetros de diseño para el dimensionamiento de zonas de bioretención.	204
Tabla 78. Principales resultados del dimensionamiento de zonas de bioretención.....	205
Tabla 79. Variables hidrológicas requeridas para el diseño – Pavimento Poroso.....	213
Tabla 80. Variables hidrológicas requeridas para el diseño – Pavimento Poroso.....	220
Tabla 81. Principales parámetros de diseño para el dimensionamiento del pavimento poroso	224
Tabla 82. Principales resultados del dimensionamiento del pavimento poroso.....	224

Tabla 83. Variables hidrológicas requeridas para el diseño – Zanjas de Infiltración.....	230
Tabla 84. Requerimientos según test de Infiltración - Zanjas de Infiltración	232
Tabla 85. Variables hidrológicas requeridas para el diseño – Zanjas de Infiltración.....	236
Tabla 86. Principales parámetros de diseño para el dimensionamiento de zanja de infiltración	243
Tabla 87. Principales resultados del dimensionamiento de zanja de infiltración.....	243
Tabla 88. Área de drenaje de los alcorques.....	257
Tabla 89. Volumen de calidad del agua.	258
Tabla 90. Principales parámetros de diseño para el dimensionamiento de los alcorques inundables.	

.....	258
Tabla 91. Principales resultados del dimensionamiento del alcorque inundable	259
Tabla 92. Volumen de calidad del agua.	259
Tabla 93. Variables hidrológicas requeridas para el diseño – Tanques de almacenamiento.....	266
Tabla 94. Parámetros asociados al volumen de recolección del tanque de almacenamiento.....	266
Tabla 95. Parámetros asociados al tamaño del tanque de almacenamiento.	269
Tabla 96. Valor de precipitación y escorrentía mensual tenida en cuenta para el diseño hidrológico de Tanques de Almacenamiento	271
Tabla 97. Principales parámetros de diseño para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento.....	272
Tabla 98. Principales resultados (mensuales) del dimensionamiento del tanque de almacenamiento	272
Tabla 99. Principales resultados del dimensionamiento del tanque de almacenamiento	272
Tabla 100. Estructuras anexas típicas para cada tipología.	274
Tabla 101. Estructuras anexas típicas para cada tipología.	276
Tabla 102. Restricciones de implementación.....	279
Tabla 103. Restricciones en las dimensiones del grass buffer.	279
Tabla 104. Características recomendadas para los separadores de aceites de placas corrugadas ...	282
Tabla 105. Dimensiones recomendadas para la antecámara	284
Tabla 106. Dimensiones recomendadas.	285
Tabla 107. Características recomendadas.	288
Tabla 108. Recomendaciones de diseño para el distribuidor de flujo.....	295
Tabla 109. Características de la tipología y el tubo vertical perforado.	297
Tabla 110. Características que influencia la descarga del culvert.....	299

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o
 tecnologías de sistemas urbanos de
 drenaje sostenible (SUDS) que más se
 adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Tabla 111. Variables de diseño para vertederos en tierra. Adaptada de (Virginia Department of Transportation, 2013).....	305
Tabla 112. Características recomendadas de acuerdo a la normativa de INVÍAS.	309
Tabla 113. Dimensiones recomendadas.	310
Tabla 114. Dimensiones recomendadas.	311
Tabla 115. Área total recomendada.....	311
Tabla 116. Variables a considerar de acuerdo a la estructura de salida	312
Tabla 117. Normatividad vigente para el diseño y construcción de pozos de inspección	317
Tabla 118. Requerimientos del componente mineral para el suelo.....	318

Tabla 119. Parámetros para el uso de compost en las Zonas de Bioretención.....	319
Tabla 120. Características recomendadas para los suelos utilizados en las Zonas de Bioretención.....	319
Tabla 121. Composición recomendada para el suelo.....	322
Tabla 122. Granulometría concreto hidráulico poroso ASTM C33.....	326
Tabla 123. Granulometría mezcla asfáltica porosa	327
Tabla 124. Gradación del material de la capa de transición.....	328
Tabla 125. Gradación del material de la sub-base.....	328
Tabla 126. Gradación del material de la capa filtrante.....	329
Tabla 127. Zonificación del área urbana de acuerdo a su humedad (precipitación).	334
Tabla 128. Clasificación de la distancia óptima de plantas empleadas en coberturas vegetales.....	334
Tabla 129. Clasificación de la distancia óptima de plantas empleadas en arbolado.	335
Tabla 130. Especies vegetales (árboles y arbustos) aplicables en el diseño de Alcorque Inundables.	337
Tabla 131. Especies vegetales (coberturas) aplicables en el diseño de CSDE.....	339
Tabla 132. Especies vegetales (coberturas) aplicables en el diseño de Cunetas Verdes.....	340
Tabla 133. Especies vegetales (coberturas) aplicables en el diseño de Zonas de Bioretención.....	342
Tabla 134. Especies vegetales (coberturas) aplicables en el diseño de Filtros de Arena.	343
Tabla 135. Especies vegetales (coberturas) aplicables en el diseño de Humedales Artificiales.	345
Tabla 136. Especies vegetales (coberturas) aplicables en el diseño de Pondajes Húmedos.	346
Tabla 137. Especies vegetales (coberturas) aplicables en el diseño de Zanjias de Infiltración.....	347
Tabla 138. Tipos de Actividades de Mantenimiento.....	349

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o
 tecnologías de sistemas urbanos de
 drenaje sostenible (SUDS) que más se
 adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Tabla 139. Matriz resumen de las actividades de mantenimiento generales para las tipologías de SUDS.....	351
Tabla 140. Actividades de operación y mantenimiento para las zonas de bioretención	355
Tabla 141. Requerimientos de inspección para las zonas de bioretención.....	356
Tabla 142. Actividades de operación y mantenimiento para las cunetas verdes.....	357
Tabla 143. Requerimientos de inspección para las cunetas verdes.....	359
Tabla 144. Actividades de operación y mantenimiento para las cuencas secas de drenaje extendidas	360
Tabla 145. Requerimientos de inspección para las cuencas secas de drenaje extendidas.....	361
Tabla 146. Actividades de operación y mantenimiento para los alcorques inundables.....	362

Tabla 147. Requerimientos de inspección para los alcorques inundables.....	363
Tabla 148. Actividades de operación y mantenimiento para los tanques de almacenamiento.....	364
Tabla 149. Requerimientos de inspección para los tanques de almacenamiento	365
Tabla 150. Actividades de operación y mantenimiento para las zanjas de infiltración.....	365
Tabla 151. Requerimientos de inspección para las zanjas de infiltración.....	366
Tabla 152. Actividades de operación y mantenimiento para los pavimentos porosos.....	367
Tabla 153. Requerimientos de inspección para los pavimentos porosos	368
Tabla 154. Métodos usuales para la determinación de parámetros en línea.....	373
Tabla 155. Requerimientos mínimos para toma de muestras de calidad de agua y posterior análisis en laboratorio (Tomado y adaptado de Manrique y Velásquez, 2008; Uniandes – Acuagyr, 2005; APHA/AWWA/WEF, 2005; EPA, 2004).	378
Tabla 156. Descripción herramientas participativas.	386
Tabla 157. Objetivos de las actividades durante la construcción.....	389
Tabla 158. Objetivos de los carteles formativos	391
Tabla 159. Convenciones para el desarrollo de cartografía social	395
Tabla 160. Actividades a realizar en Jornadas.	397

Índice de Figuras

Figura 1. Evolución de temáticas consideradas en el drenaje urbano. Adaptado de Fletcher et al. (2014).....	26
Figura 2. Subcuencas pluviales con alcantarillado separado y combinado.....	27
Figura 3. Metodología de selección de sitios.....	34
Figura 4. Mapa de marco de referencia y unidades de análisis.....	46
Figura 5. Mapa de espacio público de la ciudad de Bogotá	51
Figura 6. Mapa de Priorización Conjunta de UGAS por el objetivo de manejo de escorrentía.....	52
Figura 7. Mapa Conjunto de Clasificación de UGAS por Rangos de Calidad de ríos y humedales.	53

Figura 8. Mapa de priorización de UGAS a partir del análisis ambiental, social y económico de la amenidad	54
Figura 9. Área de proyectos de renovación urbana cuantificada por UGA.....	55
Figura 10. Mapa de identificación de los puntos de entrada de quebradas al sistema de drenaje construido y a los principales ríos presentes en Bogotá	56
Figura 11. Priorización conjunta de UGAs por manejo de escorrentía y calidad de agua de ríos, quebradas y humedales.....	57
Figura 12. Mapa de áreas potenciales priorizadas por objetivos de interés.	58
Figura 13. Metodología de selección de tipología	61
Figura 14. Mapa de tipologías adecuadas (Ejemplo área cercanas al río Fucha).....	63
Figura 15. Ejemplo cuneta verde Tomado de Massachusetts Stormwater Handbook (2008).....	86
Figura 16. Ejemplo tanque de almacenamiento Tomado de Toronto and Region Conservation Authority (2010).....	87
Figura 17. Ejemplo zonas de bioretención Tomado de Massachusetts Stormwater Hadbook (2008)	88
Figura 18. Ejemplo alcorques inundables Tomado de Stormwater Best Management Practices: Guidance Document (2013)	89
Figura 19. Ejemplo cuenca seca de drenaje extendida Tomado de Massachusetts Stormwater Hadbook (2008).....	90
Figura 20. Ejemplo zanja de infiltración Tomado de Massachusetts Stormwater Hadbook (2008). 91	
Figura 21. Ejemplo pavimentos porosos Tomado de Stormwater Best Management Practices: Guidance Document (2013)	92
Figura 22. Calificación de desempeño cunetas verdes.....	93
Figura 23. Calificación de desempeño tanque de almacenamiento.....	93

15

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Figura 24. Calificación de desempeño zonas de bioretención	94
Figura 25. Calificación de desempeño alcorques inundables.....	94
Figura 26. Calificación de desempeño cuenca seca de drenaje extendida	95
Figura 27. Calificación de desempeño zanjas de infiltración.....	95
Figura 28. Calificación de desempeño pavimentos porosos	96
Figura 29. Secuencia del tren de tratamiento.	97
Figura 30. Tratamientos en línea y fuera de línea	100
Figura 31. Flujos y procesos en tratamiento por retención	101
Figura 32. Flujos y procesos en tratamiento por detención.....	102
Figura 33. Ejemplo de punto de inflexión.....	104

Figura 34. Factor Ki	108
Figura 35. Factor K4	110
Figura 36. Punto de inflexión diario vs. Punto de inflexión de tormentas separadas con criterio de ta = 6 hr.....	115
Figura 37. Punto de inflexión diario vs. Punto de inflexión de tormentas separadas con criterio de ta = adoptado.....	116
Figura 38. Percentil 90 de lluvias diarias vs. Punto de inflexión de tormentas separadas con criterio de ta = adoptado	116
Figura 39. Mapa de distribución espacial de h_p propuesto para la ciudad de Bogotá	
120 Figura 40. Cuenca seca con taludes con vegetación	122
Figura 41. Cuenca seca de drenaje extendida. Se observa el canal de caudales bajos y la micropiscina	123
Figura 42. Planta Esquemática de una Cuenca Seca de Drenaje Extendida.	
125 Figura 43. Perfil Esquemático de una Cuenca Seca de Drenaje Extendida.	126
Figura 44. Micropiscina y estructura de salida para una estructura diseñada a partir del volumen de calidad de agua.....	128
Figura 45. Micropiscina y estructura de salida para una estructura diseñada a partir del volumen de control de inundaciones.....	128
Figura 46. Procedimiento para obtener la geometría de la cuenca seca de drenaje extendida	129
Figura 47. Procedimiento para dimensionar la antecámara de la cuenca seca de drenaje extendida	131
Figura 48. Procedimiento para dimensionar el canal de caudales bajos de la cuenca seca de drenaje extendida	133

16

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Figura 49. Rejilla – estructura de salida. Obtenido de (Urban Drainage and Flood Control District, 2010).	134
Figura 50. Procedimiento para dimensionar la estructura de salida de la cuenca seca de drenaje extendida	134
Figura 51. Procedimiento para dimensionar la rejilla de basuras de la cuenca seca de drenaje extendida	137
Figura 52. Procedimiento para realizar la corrección del volumen por infiltración en la cuenca seca de drenaje extendida.....	139
Figura 53. Planta Esquemática de una Cuenca Seca de Drenaje Extendida.	141
Figura 54. Perfil Esquemático de una Cuenca Seca de Drenaje Extendida.	142

Figura 55. Rejilla – estructura de salida.....	142
Figura 56. Área de drenaje de la cuenca seca de drenaje extendida en el Piloto de SUDS del Parque San Cristóbal Sur.....	146
Figura 57. Esquema de predimensionamiento para la cuenca seca de drenaje extendida.....	151
Figura 58. Cuneta verde en un evento de precipitación	152
Figura 59. Cuneta verde con medio filtrante.....	153
Figura 60. Cunetas verdes con barreras de detención	154
Figura 61. Planta Esquemática de una Cuneta Verde	155
Figura 62. Perfil Esquemático de una Cuneta Verde.	156
Figura 63. Vista frontal de una Cuneta Verde – estructura de salida.....	157
Figura 64. Procedimiento empleado para encontrar el caudal de diseño de una Cuneta Verde.....	158
Figura 65. Procedimiento propuesto para el dimensionamiento y diseño hidráulico de una Cuneta Verde.....	159
Figura 66. Procedimiento de dimensionamiento del parámetro altura libre para una Cuneta Verde.	164
Figura 67. Procedimiento para obtener parámetros asociados al dimensionamiento de barreras de detención en Cunetas Verdes.	165
Figura 68. Esquema ilustrativo de la altura acumulada requerida.....	166
Figura 69. Planta Esquemática de una Cuneta Verde	167
Figura 70. Perfil Esquemático de una Cuneta Verde.	168
Figura 71. Vista frontal de una Cuneta Verde.....	169
Figura 72: Procedimiento empleado para identificar las distintas características del sitio donde se implemente la cuneta verde.....	171

17

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o
 tecnologías de sistemas urbanos de
 drenaje sostenible (SUDS) que más se
 adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Figura 73. Área de drenaje de la cuenta.	171
Figura 74: Procedimiento para definir los flujos de diseño de una cuneta verde.....	172
Figura 75: Procedimiento de diseño de una cuneta verde	173
Figura 76: Procedimiento de verificación de la velocidad en la zona aguas abajo para una cuneta verde.....	175
Figura 77: Procedimiento de verificación de la velocidad en la zona aguas arriba para una cuneta verde.....	177
Figura 78. Área de drenaje de la cuneta verde en el Piloto de SUDS del Parque San Cristóbal Sur	179
Figura 79. Esquema de predimensionamiento para la cuneta verde	182

Figura 80. Zonas de bioretención en un andén.....	183
Figura 81. Zonas de bioretención laterales a una avenida.....	184
Figura 82. Zonas de bioretención en áreas privadas – Jardines de lluvia.....	185
Figura 83. Zonas de bioretención en un evento de precipitación.....	186
Figura 84. Plano en planta – Zonas de Bioretención.....	187
Figura 85. Perfiles A y B - Estructura con infiltración parcial (Izq.) y sin infiltración (der.) (Ver Figura 1).....	188
Figura 86. Perfil A - Estructura con infiltración (ver Figura 1). Figura 87. Perfil C (ver Figura 1).....	189
Figura 88. Perfil D (ver Figura 1). Figura 89. Perfil E (ver Figura 1).....	189
Figura 90. Procedimiento de diseño de la geometría – Zonas de Bioretención.	191
Figura 91. Procedimiento de diseño – estructura de salida – Zonas de Bioretención.	193
Figura 92. Planta esquemática – Zonas de Bioretención (Metodología de Riverside).....	195
Figura 93. Procedimiento de diseño – Zonas de Bioretención.....	198
Figura 94. Sección transversal – Zona de bioretención con pendiente lateral.	199
Figura 95. Sección transversal – Zona de bioretención sin pendiente lateral.....	200
Figura 96. Procedimiento de diseño – Otras estructuras- Zonas de Bioretención.....	201
Figura 97. Área de drenaje de en el Piloto de SUDS del Separador Av. Boyacá – Tunal	202
Figura 98. Esquema de predimensionamiento para la zona de bioretención	205
Figura 99. Pavimentos permeables – Tipo: Mezcla asfáltica permeable	207
Figura 100. Pavimentos permeables – Tipo: Concreto hidráulico permeable.....	207

Figura 101. Pavimentos permeables – Tipo: Adoquines entrelazados.....	208
Figura 102. Pavimentos permeables – Tipo: Adoquines de rejillas de concreto.....	208
Figura 103. Perfil Esquemático de un pavimento poroso con infiltración.	210
Figura 104. Perfil Esquemático de un pavimento poroso con infiltración parcial.	211
Figura 105. Perfil Esquemático de un pavimento poroso sin infiltración.	212
Figura 106. Procedimiento empleado para seleccionar el tipo de pavimento poroso.	214
Figura 107. Procedimiento empleado para definir la relación tributaria impermeable	215
Figura 108. Procedimiento empleado para definir la profundidad del reservorio.....	217
Figura 109. Procedimiento empleado para diseñar una estructura de salida.....	218

Figura 110. Perfil Esquemático de un pavimento poroso con infiltración.	219
Figura 111. Procedimiento propuesto para calcular el área superficial del pavimento poroso	221
Figura 112. Área de drenaje de en el Piloto de SUDS del Parque San Cristóbal Sur	223
Figura 113. Esquema de predimensionamiento para la estructura de pavimento poroso.....	225
Figura 114. Ejemplo de aplicación de zanja de infiltración.	226
Figura 115. Construcción de zanja de infiltración con drenaje	227
Figura 116. Sección transversal – Zanja de Infiltración.....	229
Figura 117. Procedimiento de diseño geométrico – Zanjas de Infiltración.....	231
Figura 118. Sección transversal – Zanja de Infiltración.....	235
Figura 119. Procedimiento de diseño - Zanja de Infiltración.....	237
Figura 120. Procedimiento de diseño – Zanjas de Infiltración (segunda parte).....	238
Figura 121. Sección transversal – zanja de infiltración con estructura de rebose.....	241
Figura 122. Área de drenaje de la zanja de infiltración del Separador Av. Boyacá – Tunal	242
Figura 123. Esquema de predimensionamiento para zanja de infiltración.....	244
Figura 124. Alcorque inundable con sistema deflector.....	245
Figura 125. Alcorque inundable.....	246
Figura 126. Alcorques inundables. Entradas laterales de escorrentía	247
Figura 127. Alcorques inundables localizados en un corredor comercial.....	248
Figura 128. Diagrama Esquemático de una estructura de alcorque inundable.....	249
Figura 129. Procedimiento propuesto para la comprobación de diseño de las variables del dimensionamiento	251

Figura 130. Procedimiento propuesto para el diseño de la capa de drenaje.....	253
Figura 131. Procedimiento de cálculo del volumen de encharcamiento.	255
Figura 132. Procedimiento de la comprobación de diseño del Alcorque inundable.	256
Figura 133. Área de drenaje de la cuneta verde en el Piloto de SUDS del Parque San Cristóbal Sur	257
Figura 134. Esquema de predimensionamiento para los alcorques inundables.	260
Figura 135. Ejemplos de Tanques de almacenamiento de tipo 1) subterráneo y 2) superficial.	261
Figura 136. Perfil Esquemático de un tanque de almacenamiento.....	264
Figura 137. Perfil Esquemático de un Tanque subterráneo.....	265
Figura 138. Procedimiento de dimensionamiento del tamaño de un Tanque de Almacenamiento.	268

Figura 139. Área de drenaje del tanque de almacenamiento en el Piloto de SUDS en el Jardín San Cristóbal	270
Figura 140. Esquema de predimensionamiento para el tanque de almacenamiento propuesto para el Jardín San Cristóbal.	273
Figura 141. Filtro tipo bolsa. Obtenido de (FLeXstorm Pure, 2014).....	277
Figura 142. Filtro tipo canasta con medio filtrante en la parte superior. Obtenido de (BioClean, s.f.)	278
Figura 143. Grass buffer antes de zona de bio retención. Fuente: (Essex County Council, 2012). 278	
Figura 144. Perfil esquemático de un separador de aceites. Elaborado a partir de: (M.E.H.L. Integrated Waste Management Facility , 2012; DEQ Michigan, 1992).....	282
Figura 145. Antecámara en una zona de bioretención. Fuente: (CSU Urban Water Center, s.f.)... 283	
Figura 146. Antecámara en una zona de bioretención. (NC Department of Transportation, 2014).283	
Figura 147. Vado utilizado como entrada para una zona de bioretención. Fuente: (Toronto and Region Conservation Authority, 2010).	286
Figura 148. Vado con rejilla empleado como entrada a una zona de bioretención. Fuente: (Green Infrastructure, 2014).....	287
Figura 149. Vado con rejilla empleado como entrada a una zona de bioretención. Fuente: (Portland Public Schools, s.f.).....	287
Figura 150. Topes de concreto empleados como parte de la entrada de una zona de bioretención. Fuente: (The City of New York, 2008).....	288
Figura 151. Entrada con cabezal a una zona de bioretención. Fuente: (Toronto and Region Conservation Authority, 2010).....	289
Figura 152. Enrocado a la entrada de una zona de bioretención. Fuente: (Volkening, 2014).....	290

20

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Figura 153. Barreras de detención en una cuneta verde. Fuente: (Stormwater Maintenance and Consulting, LLC., s.f.).....	291
Figura 154. Barreras de detención en una cuneta verde. Fuente: (Beach, 2013)	291
Figura 155. Planta esquemática de una estructura de bypass. Elaborado a partir de (City of Santa Barbara , 2013).....	293
Figura 156. Perfil esquemático de una estructura de bypass. Elaborado a partir de (City of Santa Barbara , 2013).....	293
Figura 157. Distribuidor de flujo y canal vegetado. Fuente: (North Carolina State University, 2010)	295
Figura 158. Relación entre el caudal, el diámetro del culvert y la cabeza disponible para tuberías de concreto con control a la entrada. Adaptado de (Spellman & Whiting, 2005).....	301
Figura 159. Micropiscina con vegetación. Fuente: (CASFM Stormwater Quality Committee, s.f.)	

.....	310
Figura 160. Enrocado para condiciones mínimas aguas abajo (d en cm y v en m/s). Adaptado de (Debo & Reese, 2003).....	313
Figura 161. Enrocado para condiciones máximas aguas abajo (d en cm y v en m/s). Adaptado de (Debo & Reese, 2003).....	314
Figura 162. Características del enrocado cuando no se tiene información sobre las condiciones aguas abajo. Adaptado de (Debo & Reese, 2003).....	315
Figura 163. Ejemplo de vertedero de cresta delgada (Fuente: CAR - Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, 2009).....	382
Figura 164. Diagrama de flujo de la metodología general planteada para la etapa previa a la construcción	388
Figura 165. Diagrama de flujo de la Metodología general planteada para la etapa durante la construcción	390
Figura 166. Diagrama de Flujo Metodología Después de la Construcción. Fase 1	392
Figura 167. Diagrama de Flujo de la Metodología planteada para la etapa después de la Construcción. Fase 2	394

1. INTRODUCCIÓN

La Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, EAB-ESP y la Secretaría Distrital de Ambiente, SDA, mediante convenio interadministrativo No. SDA 01269 de 2013 establecieron la necesidad de propender por un sistema urbano de drenaje que busque la adecuada calidad del agua de la escorrentía que drena hacia ríos, quebradas y humedales, que promueva el aprovechamiento del agua lluvia para usos no potables y paisajísticos y que tienda a condiciones pre-urbanas del ciclo hidrológico para prevenir y/o mitigar inundaciones. Consecuentemente, a través del mencionado convenio, la EAB-ESP contrató a la Universidad de los Andes para desarrollar la “*Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D. C.*”. El Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, CIIA, de la Facultad de Ingeniería, es el ejecutor de esta investigación.

Los objetivos específicos de la investigación son: (1) Determinar, priorizar y seleccionar las seis (6)

tipologías más apropiadas para optimizar el manejo de la escorrentía pluvial en el área urbana de Bogotá D.C. en sus diferentes localidades, entornos urbanos y usos del suelo; (2) Elaborar la guía técnica de diseño, construcción, operación, mantenimiento y monitoreo del desempeño de las seis (6) tipologías de SUDS seleccionadas, evaluadas, recomendadas y definidas como idóneas para el caso particular de Bogotá D.C., que incluye los diseños de ingeniería de detalle para la construcción y monitoreo de los pilotos de SUDS a escala real con áreas aferentes en promedio entre 0,5 y 2 ha, o para el rango de áreas recomendadas; (3) Elaborar un proyecto de norma técnica de la EAB-ESP para las diferentes tipologías de SUDS estudiadas y monitoreadas para que a futuro sea insumo para modificar las normas y cartillas de las Entidades del Distrito, responsables de implementar los SUDS en la ciudad.

Consecuentemente, la investigación busca determinar tanto las características técnicas y de desempeño de las diferentes tipologías y/o tecnologías de SUDS existentes a nivel nacional e internacional, así como identificar cuáles de ellas se ajustan a las condiciones de los sistemas de drenaje actual, a las condiciones ambientales, urbanas, socio-culturales y económicas del Distrito. Se espera que este análisis sirva de insumo para la elaboración de una guía técnica de diseño, construcción, operación, mantenimiento y monitoreo de SUDS, que además permita la proyección de la modificación de la norma técnica para el diseño y construcción del alcantarillado pluvial por parte de la EAB-ESP.

La investigación se divide en 6 actividades con sus correspondientes productos, la cual tiene una duración estimada de 18 meses. La primera actividad corresponde al estudio de los antecedentes e información de las tecnologías y/o tipologías de SUDS existentes. La segunda actividad corresponde a la investigación y desarrollo de las tecnologías y/o tipologías de SUDS que más se adapten a la problemáticas de la escorrentía pluvial urbana en la ciudad de Bogotá D. C. Como tercera actividad está la elaboración de los diseños de ingeniería de detalle de 6 pilotos de SUDS y las guías técnicas de diseño y construcción y monitoreo de estas 6 tipologías consideradas idóneas para la ciudad. La actividad 4 está constituida por el apoyo y asesoría técnica para la construcción y el monitoreo de los pilotos de tipologías. Como resultado de las actividades anteriores, la quinta actividad corresponde a la elaboración de una cartilla técnica de SUDS y una propuesta de norma técnica para las diferentes tipologías estudiadas y monitoreadas. Por último, la sexta actividad está

22

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

constituida por el desarrollo de un seminario taller sobre la investigación de SUDS para la ciudad con participación de las diferentes entidades distritales relacionadas con la implementación de SUDS.

En este informe se presenta la “Guía técnica de Diseño y Construcción” de SUDS la cual está dividida en 13 capítulos en donde se describen aspectos genéricos y descripciones de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SUDS), se incluyen las metodologías de diseño hidrológico y de predimensionamiento de las principales estructuras de las diferentes tipologías. De igual forma, se presentan consideraciones constructivas, sociales, de mantenimiento, monitoreo, requerimientos específicos de cobertura vegetal y estructuras anexas. Adicionalmente, se incluyen capítulos que contienen recomendaciones para la selección de sitios de implementación, tipologías y trenes de tratamiento. Con el fin de facilitar al usuario la utilización de esta guía, a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los capítulos que la componen, con los principales temas que se incluyen en cada sección.

Capítulo Contenido

1. **Introducción** Presenta la definición de SUDS, los beneficios de su implementación y el contexto del sistema de drenaje en Bogotá.
2. **Selección de sitios** Describe la metodología para la selección de los sitios más apropiados para la implementación de SUDS en la ciudad, según diferentes criterios y limitaciones del terreno.
3. **Selección de tipologías y tratamiento** En esta sección se propone la metodología para seleccionar la tipología o conjunto de tipologías de SUDS que podrían funcionar mejor para un sitio específico. Para ello se tienen en cuenta los objetivos de la implementación de SUDS, las características particulares del sitio y las limitaciones de las tipologías.
4. **Diseño Hidrológico** Incluye el marco hidrológico que debe tenerse en cuenta para la estimación de la precipitación y cálculo de caudales y volúmenes de tratamiento, a partir de los cuales se dimensionan las estructuras de cada tipología.
5. **Tipologías de SUDS** Presenta una descripción del funcionamiento, componentes, beneficios y limitaciones de cada tipología de SUDS. Incluye esquemas generales de las estructuras y el procedimiento para llevar a cabo el diseño de los sistemas. Para ello se adjuntan hojas de cálculo programadas para facilitar al usuario el desarrollo de estas metodologías.
6. **Estructuras anexas** Describe la información más relevante sobre las principales estructuras anexas a las diferentes tipologías de SUDS. Abarca consideraciones sobre el diseño, requerimientos y aspectos generales para

23

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o
 tecnologías de sistemas urbanos de
 drenaje sostenible (SUDS) que más se
 adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

cada estructura. Dentro de los componentes anexos se incluyen estructuras para entrada, salida, pretratamiento, rebose, disipación de energía, mantenimiento y monitoreo.

7. **Aspectos de construcción** Presenta recomendaciones para la construcción de las tipologías de SUDS. Esta sección incluye información sobre requerimientos de los suelos, de las capas que los componen, estructuras de drenaje y otros. Adicionalmente, se describen actividades a tener en cuenta antes y durante la construcción de las tipologías.
8. **Cobertura vegetal** Describe la información correspondiente a las características de los diferentes tipos de cobertura vegetal que pueden utilizarse en las tipologías. Incluye los listados de especies nativas de árboles, plantas y césped que pueden favorecer el desempeño de los SUDS que requieren vegetación.
9. **Mantenimiento** Presenta la información correspondiente a los tipos de mantenimiento de SUDS, y las

actividades

generales que requieren estos sistemas. A su vez, presenta las actividades específicas de operación, mantenimiento e inspección, para cada tipología y con su respectiva frecuencia. Incluye formatos de chequeo para llevar a cabo estas actividades de manera frecuente y organizada.

10. Monitoreo Describe de manera general los equipos, procedimientos y principales parámetros que pueden ser monitoreados en los SUDS. En esta sección se destacan algunas consideraciones para tener en cuenta en el diseño muestral de un plan de monitoreo de SUDS, así como de la inspección y evaluación de los sitios de muestreo.

11. Consideraciones sociales Compila los principales aspectos a tener en cuenta a nivel de consideraciones sociales, tanto antes de la construcción de los SUDS, como durante y después de ésta. A su vez, se resumen los principales mecanismos de inclusión de los diferentes actores involucrados en el desarrollo de la construcción de las tipologías, y las metodologías propuestas para el análisis en las tres etapas de desarrollo.

12. Referencias Se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas.

13. Anexos Se presenta el glosario de terminología de SUDS, un resumen de la normativa de la EAB que puede complementar la Guía, las hojas de cálculo para el predimensionamiento de las tipologías, y el aplicativo para la selección de tipologías y trenes de tratamiento.

24

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

5.1. Propósito de la Guía

La presente Guía fue desarrollada como parte de la “*Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D. C.*”, que es ejecutada por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, CIIA, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. La investigación surge del convenio interadministrativo No. SDA 01269 de 2013 – No. EAB 9-07-26200-0912-20 13, entre la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, EAB y la Secretaría Distrital de Ambiente, SDA. La Guía de Diseño y Construcción de SUDS corresponde al tercer producto de esta investigación. Es importante destacar que previamente, en el primer producto se desarrolló una revisión bibliográfica de la información disponible a nivel nacional e internacional; por otro lado, en el segundo producto se seleccionaron aquellas tipologías más adecuadas para su implementación en la ciudad de Bogotá.

De esta forma, teniendo en cuenta los resultados de los productos previos, la Guía de Diseño y Construcción presenta la información pertinente para las siete tipologías más adecuadas para su implementación en Bogotá, que corresponden a los alcorques inundables, tanques de almacenamiento, cunetas verdes, zonas de bioretención, zanjas de infiltración, pavimentos porosos y cuenca seca de drenaje extendida. Sin embargo, la implementación de SUDS no debe reducirse sólo a este listado de tipologías descritas, pues existe un gran conjunto de tipologías que pueden ser

construidas como estructuras complementarias al sistema de drenaje de la ciudad. Finalmente, esta Guía se constituye como un referente para la implementación de SUDS en la ciudad de Bogotá. Incluye información que puede ser utilizada por diseñadores, constructores públicos y privados, consultores e investigadores que estén relacionados a la temática del drenaje urbano.

5.2. Sistemas de drenaje urbano sostenible

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son sistemas alternativos de drenaje que hacen parte de la infraestructura urbana para el manejo de aguas pluviales. Su principio básico es el de mitigar los cambios en la hidrología, producto del desarrollo y las intervenciones antropogénicas mediante la emulación del ciclo hidrológico y las condiciones previas a la intervención, con el objetivo de evolucionar hacia un régimen más natural de flujo. Esto se aplica a través de estructuras y/o tipologías diseñadas para reducir los efectos de inundaciones por medio de la retención y/o detención del agua de escorrentía, promover la infiltración, mejorar la calidad del agua que le llega a los cuerpos receptores, incentivar el reuso de agua, generar amenidad y paisajismo. Estas estructuras y/o tipologías son complementarias al sistema de drenaje convencional y se pueden mencionar entre otras: cunetas verdes, cuencas secas de drenaje extendido, zonas de bioretención, zanjas de infiltración, alcorques inundables, humedales artificiales, pondajes húmedos, pavimentos/concretos porosos y tanques de almacenamiento. En la Figura 1 se presenta un esquema de los diferentes aspectos tenidos en cuenta en el manejo de la escorrentía a nivel urbano. En la actualidad, la mayoría de estas visiones pueden ser desarrolladas a través de la inclusión de sistemas alternativos de drenaje como los SUDS.

Dentro de los principales beneficios de la implementación de las tipologías SUDS como parte del sistema de drenaje de una ciudad, se incluyen los siguientes:

- Manejo de la escorrentía tan cerca de la fuente como sea posible haciendo uso de prácticas a micro-escala (micro-manejo).
- Reducción de las cargas de contaminantes en el agua de escorrentía que llega al sistema de drenaje convencional o que es descargada directamente a los cuerpos receptores. - Promoción de diseños sensibles con el medio ambiente combinados con controles tradicionales de la escorrentía.
- Preservación de cuerpos de agua naturales y las funciones hidrológicas naturales creando paisajes multifuncionales.
- Integración de estrategias para el manejo de la escorrentía desde etapas iniciales de la planeación y el diseño
- Reducción de costos de construcción y mantenimiento de la infraestructura de drenaje convencional de escorrentía.
- Empoderamiento de las comunidades para la protección ambiental a través de educación pública y participación ciudadana.

5.3. Sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá

El sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá se compone de un sistema natural y un sistema construido. Como parte del sistema natural, se incluyen las quebradas, ríos y humedales que han funcionado como el sistema de drenaje desde antes del desarrollo urbano de la ciudad. Ahora bien, el sistema construido consiste en aquellos componentes que se han incluido en la infraestructura de la ciudad, los cuales facilitan la evacuación de la escorrentía de manera rápida evitando que se presenten eventos de inundaciones. Dado que los ríos son los principales mecanismos de drenaje del agua lluvia en Bogotá, éstos se han incluido como eje central del sistema de drenaje de la ciudad. De esta forma, se cuenta con 4 cuencas que reciben la escorrentía producida en todo el perímetro

26

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

urbano; estas cuencas corresponden a los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo. La distribución de estas cuencas se puede observar en la Figura 2.

Figura 2. Subcuencas pluviales con alcantarillado separado y combinado

Adicionalmente, en la Figura 2 se presentan las subcuencas, de cada una de las 4 cuencas principales, diferenciadas de acuerdo al sistema de alcantarillado pluvial, separado o combinado. En general, el sistema combinado predomina en el centro y el oriente de la ciudad, mientras que el sistema separado se encuentra principalmente en la parte occidental y norte, especialmente en las zonas que se han desarrollado en los últimos años. Esta diferenciación de los sistemas de alcantarillado en la ciudad son relevantes desde el punto de vista de capacidad y calidad del agua, dado que en las áreas con sistemas combinados el agua lluvia se mezcla con el agua residual y éstas son transportadas en un solo sistema, mientras que en el sistema separado ambos tipos de agua tienen su propio drenaje.

En este punto, es importante resaltar que aunque el sistema actual de alcantarillado de la ciudad tiene una alta capacidad, aún se presentan zonas con alta probabilidad de inundación y zonas con una alta frecuencia de encharcamiento por bloqueos del sistema de drenaje. Por esta razón, se considera apropiado implementar sistemas de drenaje sostenibles en la ciudad de Bogotá ya que, como se mencionó previamente, estos complementan el sistema convencional y mejoran el desempeño global del sistema de drenaje. A su vez, los SUDS permiten alcanzar otros objetivos adicionales, que no se contemplan en el sistema de alcantarillado convencional, como la mejora en la calidad del agua, la preservación de zonas naturales e, incluso, pueden contribuir a la amenidad en algunos casos.

2. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE SITIOS

5.4. Introducción

El proceso de selección de los sitios más adecuados para ser intervenidos con sistemas de drenaje

urbano sostenible, no sólo debe seguir el desarrollo sistemático y metodológico de un procedimiento ya establecido, en donde se relacionen diferentes variables técnicas y se determine el grado de cumplimiento de las distintas restricciones involucradas para cada uno de los sistemas evaluados. Este proceso debe poseer de modo complementario un componente estratégico particular, que permita seleccionar no sólo aquellos sitios que satisfagan todas las limitaciones técnicas de cada uno de los sistemas, sino que además, su selección determine el sitio más óptimo, que garantice la mayor cantidad posible de beneficios sociales, ambientales y económicos a la población involucrada en el sitio de estudio. En este sentido, la siguiente guía de selección de sitios presentará de forma ilustrativa un esquema general de algunos de los aspectos más relevantes a considerar dentro de planes y proyectos de implementación de SUDS. Cada lugar es diferente y por lo tanto cada uno presenta características y necesidades particulares, por lo cual es preciso involucrar a este proceso de selección toda la información específica de la zona que se considere necesaria, para de esta manera realizar un mejor análisis de selección, y así asegurar que el sitio seleccionado sea verdaderamente el más conveniente.

Ahora bien, al igual que algunas de las metodologías propuestas en el presente proyecto, la selección del sitio para la implementación de SUDS debe cumplir con una serie de objetivos, los cuales tienen la finalidad de garantizar que la intervención realizada no altere en lo posible, las características naturales de drenaje de agua pluvial del sitio, o en caso de que éste ya posea algún tipo de infraestructura que impida o dificulte el drenaje del lugar, la intervención implementada deberá mejorarlo, para de esta manera lograr preservar los recursos existentes, y mejorar los beneficios que éstos estén brindando. Algunos de los objetivos más relevantes son:

- Aprovechar las condiciones hidrológicas naturales del sitio, identificando zonas potenciales como vías, edificaciones y estructuras de drenaje precedentes.
- Minimizar la perturbación del suelo y la vegetación preexistente.
- Hacer uso o modificar las condiciones actuales del suelo superficial, sub superficial y la vegetación del lugar para cada una de las tipologías en particular.
- Reducir el impacto del sitio intervenido, disminuyendo la compactación del suelo y la impermeabilización de áreas naturales.
- Amortiguar o disminuir la generación de escorrentía de eventos cortos de lluvia. - Proveer de tratamiento a la escorrentía urbana generada de eventos de lluvia, tan cerca como sea posible del lugar en el que se origina.
- Incorporar múltiples usos al sitio intervenido.
- Transformar la concepción del agua pluvial, más como recurso que como residuo. - Integrar en el análisis del sitio los planes y proyectos urbanos previstos para la zona. - Involucrar a la comunidad en el proceso de selección, para así conocer las necesidades urbanas, ambientales y paisajísticas que ésta identifique como insatisfechas.

Los aspectos más usuales dentro del análisis técnico del sitio son aquellos que evalúan, entre otros: las condiciones granulométricas del suelo, su potencial de infiltración, la topografía del lugar, el área de drenaje, las características del agua subterránea, el flujo base, la vegetación nativa y preexistente, el área de humedales, el sistema de drenaje existente y las posibilidades de desarrollo futuro en la cuenca tributaria.

Adicionalmente, se deben evaluar aspectos de tipo urbano y social, de modo que la intervención realizada contribuya con el mejoramiento paisajístico de la ciudad, así como también, disminuya en cierto grado el incremento de zonas duras e impermeables como consecuencia del desarrollo expansivo de la misma. Se debe considerar en todo momento a la comunidad que habita en las cercanías del sitio a intervenir, debido a que ésta constituye un actor clave en el adecuado desarrollo de sistemas urbanos de drenaje sostenible. Un desconocimiento o una resistencia por parte de la población del lugar a este tipo de estructuras, puede llevar de manera precipitada a la ineffectividad de las intervenciones realizadas. En este sentido, es ineludible analizar previamente, entre otros aspectos: el grado de desarrollo urbano, social y económico de la zona, los planes y proyectos urbanos existentes y presupuestados para ésta, las actividades comerciales más frecuentes de la misma y el grado de cohesión y compromiso que tiene la comunidad frente a la implementación de infraestructura pública en las cercanías de sus lugares de residencia.

5.5. Aspectos técnicos del sitio de interés

5.5.1. Tipo de suelo

Los suelos con una alta permeabilidad tienen un potencial importante para la implementación de tipologías que permitan la infiltración del agua en el suelo circundante. No obstante, si el suelo a intervenir presenta una baja permeabilidad, es posible incluir en el diseño de la tipología seleccionada, sistemas complementarios de drenaje subterráneo, los cuales contribuyan con el drenaje del agua detenida o retenida en la tipología. Por otro lado, en caso de que el suelo presente una probabilidad media o alta de hinchazón (swelling) debido a la acumulación de agua, las prácticas de infiltración se deben evitar en este sitio, para disminuir de esta manera los posibles daños a la infraestructura adyacente (p. ej. construcciones, edificios y/o vías), debido a la modificación paulatina y prolongada (expansión/contracción) del suelo. En cualquier caso, es necesario consultar al ingeniero geotécnico o profesional relacionado, cuando el diseño de la tipología se encuentre cercano a infraestructura ya existente, para que éste determine la distancia mínima a la cual es posible intervenir el suelo con una tipología que permita la infiltración de agua en el suelo.

5.5.2. Tamaño de la cuenca

El tamaño de la cuenca de drenaje que contribuye a cualquiera de las tipologías seleccionadas, es una variable de relevancia, tanto a escala de tipología como a escala de ciudad. En la primera escala, es importante ya que permite dimensionar la capacidad mínima que debe tener la estructura, tomando en consideración el tiempo de drenaje de la misma. Por otro lado, a escala de ciudad, esta variable se vuelve relevante ya que permite limitar el área máxima de drenaje que contribuye a una tipología particular, para de esta manera garantizar el adecuado almacenamiento y/o tratamiento del agua que ingrese a la estructura.

5.5.3. Aguas subterráneas

En relación a la profundidad de la tabla de agua del sitio a intervenir, es necesario evaluar los casos en los cuales el nivel freático de éste sea poco profundo, debido a que esta característica impone desafíos importantes en el diseño y construcción de estructuras que involucren prácticas de infiltración y deban drenar completamente el agua acumulada entre eventos de lluvia. Un nivel de agua subterránea muy próximo a la superficie, restringe la capacidad de infiltrar agua de escorrentía, y/o impide el almacenamiento del volumen de diseño. No obstante, para algunas tipologías de

retención, la cercanía del nivel freático a la superficie del suelo, puede permitir la saturación eficiente de la zona radicular de las plantas acuáticas presentes al interior de la tipología (p. ej. pondajes húmedos), así como también, contribuir con la recarga del acuífero y la preservación del flujo base.

La protección de la calidad del agua subterránea es uno de los asuntos principales que debe considerarse para aquellas tipologías que tienen la capacidad de infiltrar el agua detenida y/o retenida. En este sentido, si el sitio intervenido presenta algún tipo de contaminación del suelo, debido a la cercanía de éste con zonas en donde se almacenen sustancias tóxicas (p. ej. estaciones de gasolina), se usen materiales o se generen residuos que tengan el potencial de contaminar el agua subterránea (p. ej. zonas de construcción y minas, entre otras), se recomienda evitar aquellas tipologías que permitan la infiltración del agua, para prevenir de esta manera cualquier tipo de contingencia inesperada de estas zonas adyacentes. Por otro lado, si el agua subterránea o el suelo del sitio, ya presenta algún tipo de contaminación y no es posible remediarla, es necesario optar por tipologías que no posean la capacidad de infiltrar el agua, o en casos particulares, hacer uso de una capa gruesa de recubrimiento impermeable (p. ej. geomembranas), que impida el paso del agua hacia las áreas contaminadas.

5.5.4. Flujo base

La presencia de un flujo base en el sitio a intervenir es esencial para el adecuado funcionamiento de aquellas tipologías que estén diseñadas para retener el agua de escorrentía, tales como: humedales artificiales, pondajes húmedos y canales húmedos. En caso de que el flujo base no exista en estas estructuras, es probable que éstas puedan secarse, lo cual impactaría de forma directa la vegetación acuática que se haya podido desarrollar durante el tiempo de lluvias. Consecuentemente, se podría afectar la eficiencia de remoción de contaminantes del agua de escorrentía que ingrese a la estructura en el próximo evento de lluvia, y por lo tanto, se reduciría la efectividad de éstas tipologías para mejorar la calidad del agua.

5.6. Aspectos urbanos y sociales del sitio de interés

5.6.1. Actividades en desarrollos futuros

Es necesario evaluar el estado de desarrollo de la cuenca, así como los proyectos que estén en fase constructiva o aquellos ya construidos, que hayan ocasionado algún grado significativo de erosión al suelo de la zona. De esta manera, se pueden identificar las áreas que deben ser sometidas a una evaluación más rigurosa para el diseño y construcción de estructuras de drenaje, debido a que en estas áreas es más probable que se genere un arrastre más significativo de sedimentos durante los eventos de lluvia. Adicionalmente, esta evaluación de la cuenca permite identificar y prever el cambio de cobertura de áreas permeables e impermeables y los posibles flujos de residuos

30

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

contaminantes (p. ej. residuos de construcción) que puedan llegar a las tipologías implementadas. Asimismo, es indispensable analizar los aspectos de la cuenca que puedan favorecer la erosión del suelo, como las pendientes altas, la vegetación escasa, y la presencia de un alto porcentaje de suelo arcilloso. De esta forma, se busca prever de manera controlada las cargas potenciales de sedimentos que puedan ser arrastradas por la escorrentía de eventos de lluvia, y en este sentido, involucrar a las tipologías seleccionadas, estructuras anexas como sedimentadores que logren tratar y reducir de forma anticipada la carga de sedimentos que ingresa a la estructura de drenaje.

5.6.2. Limitaciones espaciales

Uno de los aspectos con más relevancia durante el proceso de diseño de sistemas de drenaje, es el espacio disponible para ser intervenido con estas estructuras, especialmente en zonas muy densificadas y altamente urbanizadas, en donde el área libre se vuelve una variable determinante para la implementación de SUDS. Este inconveniente se presenta generalmente en áreas ya desarrolladas en donde no se tenía contemplado el uso de estas tipologías. Por esta razón, una de las recomendaciones sugeridas para proyectos en nuevos desarrollos, es tomar en consideración estas nuevas alternativas de drenaje desde la planeación misma del proyecto, logrando delimitar desde un principio aquellas áreas naturales, preferiblemente extensas y que muestren un adecuado drenaje natural, ya que es allí donde generalmente es más probable implementar alguna de las tipologías evaluadas. Estas áreas deben ser protegidas de cualquier interés externo o uso distinto del que fueron concebidas, durante el tiempo en el cual no se haya iniciado con las actividades de construcción de las tipologías seleccionadas, para de esta manera garantizar que en estas áreas se conserven las condiciones naturales del suelo, y sea más efectiva la implementación y operación de SUDS.

5.6.3. Desarrollo urbano y social

El contexto urbano y social en el cual se desarrollen este tipo de sistemas, es una variables que debe influir tanto en la selección del sitio a intervenir como en los planes futuros de monitoreo y mantenimiento de las tipologías seleccionadas. En primer lugar, porque uno de los objetivos de la implementación de SUDS es mejorar en algún grado la amenidad urbana de las zonas intervenidas con estas estructuras. En este sentido, uno de los criterios de selección que podría ser utilizado para priorizar una zona en particular de la ciudad para la ejecución de estos proyectos, sería el bajo o nulo porcentaje de áreas verdes en la infraestructura urbana de la zona analizada. Adicionalmente, la alta insuficiencia de cobertura verde en un sector de la ciudad, se asocia en un amplio número de casos a zonas urbanas en donde residen poblaciones de bajos ingresos económicos y cuyas dinámicas sociales suelen ser complejas. Por esta razón, la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible debe contribuir con el mejoramiento de la calidad de vida de estos sectores de la ciudad, a través de la provisión de espacios urbanos más apropiados, que promuevan la recreación de las personas que frecuenten dichos espacios, y a su vez, se incremente el valor paisajístico del lugar.

En segundo lugar, es necesario abordar el contexto social en el que se desarrollen estos proyectos para que sea posible identificar el nivel de cohesión comunitaria de la población circundante, y que de esta manera se puedan estructurar estrategias adecuadas que logren instruir y empoderar a los diferentes actores sociales del lugar, con las labores de monitoreo y mantenimiento de las tipologías implementadas en el proyecto. De esta manera, se debe establecer desde el principio del proyecto

qué tan dispuesta y comprometida estaría la comunidad con el cuidado y seguimiento de las tipologías involucradas, para de esta manera garantizar que dichas labores se desarrollen de la forma más apropiada y con la frecuencia adecuada. Aunque en un inicio, la ejecución de estas estrategias podría requerir de un número significativo de recursos y personal capacitado, la finalidad de estas medidas es que en el largo plazo sea la propia comunidad, quién por iniciativa propia, realice de la mejor manera las labores de monitoreo y mantenimiento. De esta forma, es posible reducir los costos de funcionamiento de las tipologías implementadas, de modo que se logre incorporar la sostenibilidad no sólo a nivel social y ambiental, sino que también a nivel económico, estos sistemas de drenaje sean rentables para la comunidad y la ciudadanía en general.

5.7. Metodología de selección

La metodología de selección es un proceso que debe estar acompañado de un análisis exhaustivo de toda la información con que se cuente para un área determinada. Como se mencionó con antelación, este proceso de selección no puede ser abordado de manera estricta y sistemática, antes bien, debe poseer un componente flexible, que le permita adaptarse a la información disponible y a partir de ella procurar realizar la mejor estimación del sitio más apropiado para la implementación de SUDS. La Figura 3 presenta el esquema general de la metodología propuesta, la cual se compone de una serie de pasos consecutivos de decisión, ejecución y verificación, junto con un paso complementario de retroalimentación. Los primeros pasos de la metodología constituyen la base fundamental del proceso. En éstos se delimita el área de estudio mediante un marco de referencia y cierto número de unidades de análisis, se establece el alcance y los objetivos de la implementación para determinar a partir de éste, si la aplicación de SUDS es la alternativa más apropiada para satisfacer dicho alcance. En este sentido, para objetivos relacionados con el manejo de inundaciones producto de desborde de cauces o canales, sobreelevación de agua subterránea y control de mareas, entre otros, este tipo de sistemas de drenaje no son recomendados, ya que están enfocados al manejo de agua lluvia. Luego de este proceso de decisión, se debe recopilar la mayor cantidad posible de información existente, para de esta manera identificar cuáles son las áreas potenciales para ser intervenidas con SUDS.

Una vez desarrollada esta etapa inicial, el paso subsiguiente consiste en diferenciar y priorizar las áreas obtenidas previamente, de acuerdo con el nivel de cumplimiento del objetivo buscado en el alcance propuesto. De esta manera, se pueden priorizar las áreas potenciales que tienen una mayor capacidad para satisfacer un propósito particular (p. ej. manejar la escorrentía, mejorar la calidad de cuerpos de agua, incrementar la amenidad del lugar, promover el urbanismo y paisajismo de la ciudad y/o renaturalizar cuerpos hídricos). Así pues, es posible centrar la evaluación de los sitios factibles en áreas cada vez más restringidas. En el siguiente paso, se debe recopilar la información existente de todas las variables que condicionen las áreas priorizadas, para así comparar y elegir los sitios más convenientes para la implementación de estructuras de drenaje sostenible. Una vez se hayan depurado nuevamente las áreas posibles de intervención en un grupo cada vez más reducido, el siguiente paso de la metodología consiste en establecer un plan de recorridos y visitas a las diferentes áreas priorizadas, para así identificar en campo las características y dinámicas reales que se presentan en el lugar. Esta primera inspección de campo es fundamental para la posterior selección del sitio a intervenir, ya que permite confirmar o replantear el verdadero potencial del lugar para la implementación de SUDS.

A partir de las visitas realizadas, es posible concretar en un número limitado, las áreas potenciales más convenientes para la implementación de SUDS. En cada una de éstas, se sugiere desarrollar diferentes pruebas técnicas de campo (p. ej. levantamiento topográfico, pruebas de infiltración, pruebas de suelo, mediciones in-situ de precipitación y cuantificación de escorrentía, verificación en campo de las redes de drenaje y alcantarillado, entre otras), que permitan obtener información primaria de las condiciones reales y actualizadas del terreno de interés. Esta información recolectada en campo, no sólo será útil para comparar la idoneidad de intervención entre las diferentes áreas delimitadas en este último grupo, sino que además, permitirá corroborar la veracidad de los datos recopilados previamente. De esta manera, se podrán retroalimentar las bases de información técnica para futuros proyectos de implementación de SUDS. Por consiguiente, este paso de comparación de información se vuelve decisivo para la selección del sitio más conveniente, ya que los datos analizados hasta el momento son de tipo secundario y pueden estar sujetos a desactualización, o presentar ausencia de detalles específicos que puedan resultar importantes para la selección del sitio.

Ahora bien, el siguiente paso de la metodología, consiste en un proceso de decisión a cargo de los propietarios del proyecto. En esta etapa, ya se han aplicado los criterios técnicos suficientes para depurar en unas cuantas alternativas los sitios más convenientes para la implementación de SUDS. Para seleccionar finalmente cuál de ellos es el sitio óptimo a intervenir, es necesario aplicar un criterio subjetivo que permita elegir el más conveniente, de acuerdo con las características propias de éste. Por esta razón, en esta selección se deben considerar aspectos de tipo constructivo y operativo (p. ej. disponibilidad espacial, ubicación para la disposición de escombros, facilidad de ingreso y salida de maquinaria y rutas adecuadas de acceso al sitio de interés, entre otros), social (p. ej. integración social, seguridad del lugar, nivel educativo de la población e instancias de asociación comunitaria, entre otras) y urbano (p. ej. creación o mejoramiento de espacio ciudadanos que incrementen la recreación y el paisajismo). Una vez aplicado este criterio de selección se podrá elegir el sitio óptimo para ser intervenido con estructuras urbanas de drenaje sostenible.

Finalmente, el último paso de la metodología consiste en un proceso de evaluación del sitio resultante del paso anterior, para de esta manera verificar que éste realmente cumple con todos los requerimientos establecidos en el alcance propuesto. Por lo tanto, si los requerimientos se satisfacen con el sitio resultante, éste queda seleccionado definitivamente como el sitio óptimo para la implementación de SUDS. Una vez obtenido este resultado será posible ingresar a la siguiente metodología de selección de tipologías y trenes, en donde se determinará cuáles sistemas de drenaje y qué configuración tendrán las estructuras de SUDS más apropiadas, con el fin de satisfacer el alcance propuesto. Por otro lado, en caso de que el sitio seleccionado no garantice completamente dicho alcance, es necesario volver al segundo paso de la metodología, en donde se deberá replantear el alcance de la intervención y determinar nuevamente si la implementación de SUDS verdaderamente constituye la alternativa más adecuada para satisfacer el objetivo principal del proyecto. Si se determina que los sistemas urbanos de drenaje sostenible no son la opción más factible, se recomienda revisar guías y manuales técnicos de drenaje convencional, para de este modo lograr satisfacer por completo el alcance particular que desea alcanzar el proyecto.

Figura 3. Metodología de selección de sitios

5.7.1. Delimitar el área de estudio

El primer paso de la metodología consiste en delimitar el área del proyecto, mediante un marco de referencia espacial, el cual restrinja el terreno de interés en un área específica de estudio. Una vez establecido el marco de referencia, es posible subdividir el área delimitada en unidades de análisis más pequeñas, las cuales pueden ser evaluadas de forma más adecuada y detallada. Estas unidades de análisis pueden estar ya constituidas según la escala a la cual se haya planteado el proyecto.

Por ejemplo, para proyectos distritales o municipales, en los cuales se requiere analizar toda el área urbana de una población; el marco de referencia podría establecerse como el perímetro urbano del municipio, y las unidades de análisis podrían ser: barrios, distritos, sectores, localidades o cualquier tipo de subdivisión urbana preexistente. Por otro lado, si el proyecto de implementación de SUDS se desarrolla a una escala local particular (p. ej. proyectos constructivos residenciales, empresariales, recreativos, entre otros), el marco de referencia podría constituir el área disponible del proyecto, y las unidades de análisis podrían ser las distintas dependencias del proyecto (p. ej. zona comercial, zona administrativa, zona de tránsito peatonal, zona de recreación, entre otras).

Esta definición de marcos y unidades de análisis permitirá organizar el proceso de evaluación del área del proyecto cuándo éste presente una escala considerable, así como también, identificar prontamente cuáles son las áreas potenciales y disponibles para ser intervenir con SUDS en proyectos locales específicos. Ahora bien, cabe la posibilidad de que el proyecto no cuente con información antecedente que delimite previamente el área interna del proyecto, en este caso, se recomienda subdividir el área delimitada por el marco de referencia en un número de unidades de análisis que optimice la evaluación detallada del terreno, tomando en consideración la escala y magnitud del proyecto. Si el área se subdivide en un número muy alto de unidades, la evaluación de éstas puede resultar dispendioso y poco eficaz, y por otro lado, si esta subdivisión se hace en un número muy bajo, la evaluación implementada puede resultar general y poco práctica. Por esta razón se debe examinar cuidadosamente cuál es el número apropiado de unidades de análisis que se deberían elegir, tomando en consideración la escala y magnitud del proyecto.

5.7.2. Establecer el alcance y determinar la conveniencia de los SUDS

Luego de delimitar el área del proyecto, es necesario establecer cuál es el alcance que tendría la intervención con SUDS en el sitio seleccionado. Es decir, en este paso de la metodología, se sugiere identificar cuáles son los objetivos a los que se quiere llegar con la construcción y operación de los SUDS (p. ej. reducir volúmenes y caudales pico de escorrentía, mejorar la calidad de los cuerpos receptores de agua, incrementar la amenidad de un lugar particular, promover el urbanismo y el paisajismo de una zona urbana y/o renaturalizar cuerpos hídricos), tomando en consideración la escala y magnitud del proyecto en el cual esta metodología está enmarcada. Asimismo, se sugiere identificar de manera previa cuál sería el impacto de la implementación en el sitio seleccionado (p. ej. impacto a nivel puntual, local o general), para de esta manera evaluar más adelante el tipo de estructuras requeridas para la consecución del objetivo buscado. En este sentido, se espera que la implementación de SUDS esté en concordancia con las dimensiones propias del proyecto, para de esta manera evitar contratiempos futuros (técnicos y presupuestales) por la subestimación o sobrestimación del alcance inicial en la selección del sitio.

Usualmente, los objetivos establecidos en el alcance del proyecto involucran más de un solo propósito, puesto que la implementación de SUDS tiene el potencial de mejorar simultáneamente múltiples características del área urbana. No obstante, la capacidad específica para mejorar uno de estos aspectos en particular, dependerá en definitiva del tipo de estructura y de su configuración en el área intervenida. Por esta razón, se sugiere que desde un principio de la metodología, se determinen los resultados preliminares que se esperan obtener luego de la implementación de SUDS, para cada uno de los objetivos establecidos. Por ejemplo si los objetivos planteados en el alcance de un proyecto son: reducir la cantidad de escorrentía, mejorar la calidad de los cuerpos de agua y a su vez mejorar la amenidad del lugar intervenido. Es necesario aclarar desde un comienzo: cuánto volumen de escorrentía se desea disminuir, qué porcentaje de reducción del pico de escorrentía se pretende obtener, qué porcentajes de remoción de contaminantes (p. ej. SST, DBO, N, P, S, etc.) se desea alcanzar en la escorrentía que llega a un cuerpo de agua específico y qué nivel de incremento en la valoración subjetiva de la comunidad, con respecto a la amenidad del lugar, se espera alcanzar luego de la implementación de SUDS.

Una vez definidos los resultados esperados de la implementación, es posible delimitar y cuantificar de manera preliminar la magnitud que debería tener la intervención del área seleccionada. De esta manera, a partir de la magnitud prevista y los resultados esperados, es fundamental determinar si la

objetivos establecidos en el alcance propuesto. En este sentido, para verificar que los SUDS pueden garantizar los requerimientos de éstos se recomienda revisar las tablas comparativas de tipologías de SUDS, las cuales están incluidas en la presente guía de diseño. Asimismo, se sugiere realizar un análisis de costo-beneficio que permita evaluar la factibilidad de aplicación de SUDS en comparación con la construcción de sistemas de drenaje convencional. Cabe mencionar que dentro de éste último análisis, no sólo se deben considerar beneficios de tipo económico, sino que también deben valorarse beneficios de tipo social y ambiental, es decir aquellos relacionados con la amenidad, el urbanismo y la renaturalización de cuerpos hídricos, entre otros.

Ahora bien, un criterio adicional para determinar si la implementación de SUDS es la medida más conveniente, consiste en analizar si las soluciones esperadas son viables para el área de estudio de interés. Por ejemplo, si se planea desarrollar un proyecto de SUDS para un área totalmente urbanizada y con una alta densificación, en donde el objetivo principal de éste fuera el manejo de una cantidad significativa de escorrentía. Resultaría poco práctico e inadecuado construir grandes estructuras de drenaje que permitan la detención y/o retención de altas cantidades de agua, puesto que este tipo de tipologías (p. ej. cuenca seca de drenaje extendida) generalmente son las que mayor área requieren. Por lo tanto, para su implementación sería necesario intervenir significativamente el área urbana preexistente, lo cual podría alterar negativamente las dinámicas urbanas y sociales ya establecidas. En ese caso, el diseño y la construcción de un sistema de drenaje convencional, podría constituir una alternativa más factible, considerando el objetivo para el cual se plantea el desarrollo de ese proyecto particular.

Por consiguiente, si la implementación de SUDS satisface los requerimientos de los objetivos previstos en el alcance del proyecto, su implementación proporciona mayores beneficios que costos asociados a su construcción y operación, y su intervención en el área de interés es viable y factible, se recomienda continuar con el siguiente paso de esta metodología de selección de sitio. En caso contrario, resultaría conveniente replantear el enfoque del proyecto y realizar la selección de sitios y estructuras a partir de guías técnicas de diseño de sistemas de drenaje convencional. Sin embargo, es necesario aclarar que si se aborda una alternativa totalmente convencional, sería necesario involucrar un estudio complementario de intervención, en donde se planteen otro tipo de medidas o mecanismos suplementarios que permitan mejorar los aspectos que el sistema tradicional no puede garantizar (p. ej. mejorar la calidad de cuerpos de agua, incrementar la amenidad, renaturalizar cuerpos hídricos, entre otros), para de este modo lograr cumplir los objetivos establecidos en el alcance propuesto.

5.7.3. Recopilar información e identificar áreas potenciales de intervención

Luego de establecer el alcance de la intervención, se sugiere iniciar la búsqueda de toda la información secundaria posible para el área delimitada en el marco de referencia, tomando en consideración los objetivos establecidos en dicho alcance. Usualmente se requiere información técnica del área de interés que permita identificar las características físicas del terreno (p. ej. pendiente, nivel freático, tasa de infiltración, precipitación promedio, tipo de suelo, etc.) para así determinar si éste es apto o no para la implementación de SUDS. No obstante, para este tipo de proyectos, la información histórica (p. ej. presencia o no de estructuras de drenaje, usos del suelo y proyectos futuros de construcción) y social (p. ej. capacidad socio económica de la población, nivel de conformidad con el área urbana ocupada y tipo de emergencias asociadas con fallas en el sistema

de drenaje existente, etc.) del área de estudio, puede contribuir significativamente para determinar la conveniencia de uno u otro sitio particular, dependiendo del grado de relevancia que se le dé a estas bases de información dentro de los objetivos planteados.

Ahora bien, de acuerdo con las unidades de análisis delimitadas y la información recopilada, se propone identificar en cada una de éstas, el terreno que tiene un potencial directo de ser intervenido con SUDS. Usualmente se seleccionan áreas con escasa infraestructura urbana, en donde todavía se conserven, de forma parcial o total, las condiciones naturales del lugar. De esta manera, es posible establecer en primera instancia, aquellas áreas en donde la intervención del terreno sería más sencilla. Esta primera selección de áreas potenciales dependerá de la escala y magnitud del proyecto, así como también del carácter que éste posea, es decir, si éste es de carácter público o privado. Esta última característica del proyecto condicionará en gran medida el tipo de áreas que pueden ser seleccionadas al interior de las unidades de análisis establecidas.

En este sentido, para un proyecto de implementación de SUDS a nivel municipal de carácter público, el marco de referencia abarcará la totalidad del terreno del municipio, y las unidades de análisis establecidas sean las diferentes localidades, distritos, sectores o veredas de éste mismo. Se sugiere identificar con antelación las áreas de carácter público que tendrían un potencial importante de ser intervenidas con SUDS, como por ejemplo: parques públicos, zonas verdes, andenes, separadores, alamedas, corredores verdes y verde-azules, entre otros. Por otro lado, si se trata de un gran proyecto privado de construcción residencial, en donde el marco de referencia es el área del predio a intervenir, y las unidades de análisis son las distintas zonas del terreno con un uso del suelo particular en el proyecto (p. ej. uso residencial, uso para el tránsito peatonal y uso recreativo). Se recomienda identificar previamente las zonas del proyecto en las cuales se podría desarrollar SUDS como: accesos peatonales y vehiculares, zonas duras comunales, jardines y áreas verdes recreativas, entre otras. Adicionalmente, para proyectos de tipo privado es posible seleccionar aquellas áreas verdes contiguas al proyecto, que se encuentren en concesión con la administración municipal. En ese caso, sería necesario establecer un acuerdo común entre los dueños del proyecto y la municipalidad, para de esta manera convenir el tipo de función que cumplirían estas áreas, si se llegasen a intervenir con un sistema urbano de drenaje sostenible. Así mismo, sería necesario determinar el nivel de responsabilidad de ambos actores, en relación con las diferentes actividades de monitoreo y mantenimiento que deberían llevarse a cabo en los sistemas de drenaje implementados en este tipo de áreas.

5.7.4. Priorizar áreas por objetivo de interés

El siguiente paso de este proceso de selección de sitios se apoya en las unidades de análisis delimitadas al inicio de esta metodología y en toda la información recopilada del paso anterior. En esta etapa se busca priorizar las áreas potenciales escogidas previamente, con respecto a los objetivos identificados en el alcance propuesto, al incorporar todas las variables disponibles del terreno que permitan restringir la selección de sitios. Por esta razón, es necesario identificar de la información disponible cuál es la necesaria para priorizar una u otra área en particular, a partir de los objetivos de establecidos. Si el análisis se realiza para más de un solo objetivo, es necesario realizar la priorización de manera conjunta, para de esta forma seleccionar las áreas potenciales que cumplan de manera simultánea los objetivos evaluados. De esta manera, se espera reducir el número de áreas potenciales para la implementación de SUDS en el marco de referencia, conservando sólo aquellas que cumplan con las condiciones generales para garantizar los objetivos de la

implementación. A continuación se presentan los cinco objetivos principales evaluados en la guía de diseño para la implementación de SUDS.

Para priorizar las áreas potenciales identificadas en el paso anterior, a partir del objetivo de manejo de escorrentía, es necesario integrar variables espaciales y de suelo a cada una de éstas, con el fin de seleccionar aquellas de mayor extensión y que presenten condiciones naturales (sin ningún tipo de intervención urbana). Lo anterior, dado que este tipo de sistemas de drenaje son los que requieren de una mayor área superficial para su implementación, así como también, de ciertos parámetros hidrológicos del terreno (p. ej. Pendientes moderadas, bajas tasas de infiltración y nivel freático profundo, entre otros) para garantizar el almacenamiento de grandes volúmenes de escorrentía. De este modo será posible asegurar que la construcción y operación de tipologías aptas para detener y retener altos volúmenes de escorrentía, se desarrolle de la manera más rápida y efectiva. Al priorizar áreas potenciales con este tipo de características se espera disminuir de forma adecuada el volumen y los picos de escorrentía de eventos fuertes de precipitación. Por esta razón, la priorización de grandes áreas de terreno natural, permitiría acelerar el proceso de selección de sitios posibles para este objetivo particular.

En relación con las estructuras de detención y retención, es importante mencionar que estas tipologías usualmente deben ser integradas al área intervenida junto con estudios complementarios de paisajes y conservación de especies nativas. Esto, debido a que su implementación en el sitio seleccionado puede afectar de manera relevante la percepción visual del área, así como también las dinámicas naturales del ecosistema que allí se encuentra. Asimismo, es necesario analizar la valoración social que tiene la comunidad del área de interés, ya que generalmente estas grandes extensiones de terreno natural hacen parte de los espacios públicos de recreación de la población aledaña. Por lo tanto, si se interviene el área de interés con este tipo de estructuras, es fundamental realizar trabajos paralelos de educación y concientización con la comunidad, para de esta manera reducir al máximo los impactos sociales negativos que pueda ocasionar la intervención de estas áreas naturales.

Calidad de cuerpos de agua

Por otra parte, si el objetivo de la intervención con SUDS consiste en mejorar la calidad del agua de escorrentía que llega a cuerpos de agua receptores se recomienda integrar a las áreas potenciales del paso anterior variables hidrológicas del suelo (p. ej. tasas de infiltración, pendientes promedio, nivel freático) así como también información que permita evidenciar la presencia de cuerpos de agua cercanos, cobertura vegetal existente e infraestructura urbana actual y proyectada. De esta manera, se pueden priorizar aquellas áreas potenciales que se encuentren próximas a cuerpos de agua, o se ubiquen de forma contigua a las fuentes que generen mayor contaminación a la escorrentía generada. En primer lugar, porque las tipologías implementadas pueden actuar como mecanismo previo de tratamiento del agua que llega a los cuerpos receptores, lo cual reduce significativamente las cargas de partículas contaminantes y sedimentos gruesos. En segundo lugar, porque una de las estrategias para mejorar la calidad del agua pluvial es tratar la contaminación de ésta, tan cerca como sea posible de la fuente, para de esta manera disminuir desde un principio el impacto, los costos y la complejidad del tratamiento. Por lo tanto, para cumplir este objetivo, se debe optar por tipologías prácticas, de sencilla ubicación e implementación, que involucren algún tipo de

tratamiento al agua que ingresa a la estructura de drenaje. Generalmente, este tratamiento incluye medios granulares, lechos filtrantes y/o agentes biológicos (p. ej. microorganismo y plantas) que reducen las cargas de contaminación, mediante procesos físico-químicos como: sedimentación, filtración, adsorción y biodegradación, entre otros.

En este sentido, cabe mencionar que para este tipo de estructuras de drenaje, generalmente se requiere

un mayor nivel de monitoreo y mantenimiento, debido a que éstas son proclives a colmatarse paulatinamente por la acumulación de sedimentos y basuras. Estos residuos, obstruyen el paso del agua a través de la estructura, limitando significativamente la eficiencia de la misma. Por esta razón, para disminuir los costos de mantenimiento asociados a estas tipologías, se sugiere incorporar estructuras anexas de tratamiento (p. ej. antecámaras, trampas de grasas y sedimentos), que capten en primera instancia el volumen de escorrentía y amortigüen, de forma previa, las cargas de contaminación del agua. Por lo cual, con esta medida se espera prolongar la frecuencia del mantenimiento de la estructura, disminuyendo así los costos operativos de la misma en el largo plazo.

Asimismo, otras de las recomendaciones que se presentan en la literatura para extender la frecuencia del mantenimiento de estas estructuras, están estrechamente vinculadas a la educación de la comunidad y al incremento del compromiso de ésta por el cuidado y protección de las tipologías implementadas. En este sentido, a mayor compromiso por parte de la comunidad, menor será la carga de residuos dispuesta de manera irresponsable (p. ej. basuras, residuos vegetales o escombros) en las zonas urbanas que drenan hacia la estructura. De esta forma, menor será la carga de contaminantes arrastrados por la escorrentía en el momento en que se genere un evento de precipitación, permitiendo que los componentes de la tipologías operen de manera eficiente por un mayor periodo de tiempo.

Amenidad

Ahora bien, usualmente los objetivos principales para los cuales se desarrollan los SUDS son los dos mencionados previamente; manejar la cantidad y mejorar la calidad de la escorrentía que llega a los cuerpos de agua receptores. No obstante, existen tres objetivos adicionales que pueden resultar relevantes para la ejecución de este tipo de proyectos. El primero de ellos consiste en incrementar la amenidad de un lugar particular a partir de la implementación de este tipo de sistemas urbanos de drenaje. Entendiendo amenidad como: la creación de nuevos espacios urbanos que resulten atractivos, útiles y agradables para la población que habita en las proximidades del sitio intervenido, lo cual puede mejorar significativamente la valoración de bienestar social y ambiental percibido por la comunidad influenciada por el desarrollo de SUDS. Ahora bien, para satisfacer este propósito se recomienda implementar tipologías que cuenten en su diseño con configuraciones superficiales en donde se involucre infraestructura vegetal que resulte agradable para la población. Por esta razón, para priorizar áreas potenciales a partir de este objetivo, es necesario integrar a éstas variables como: porcentaje de cobertura vegetal, valoración ambiental y social del área, y porcentaje de impermeabilización de ésta, entre otros parámetros, para de esta manera seleccionar aquellas áreas que tienen un déficit de amenidad significativo. En este sentido, sistemas de drenaje como zonas de bioretención o alcorques inundables, entre otros, pueden funcionar adecuadamente para lugares altamente urbanizados en donde no se cuente parcial o totalmente con cobertura vegetal.

Generalmente, el incremento de amenidad de un lugar particular a partir de la implementación de SUDS, está vinculada con la mejora de la calidad de vida de la población que interactúa con el sitio intervenido. Esta mejoría se ve reflejada en el aumento de sentido de pertenencia por parte de los habitantes del lugar, y en algunos casos, en un incremento en la valoración económica de los inmuebles cercanos al lugar implementado. Adicionalmente, dirigir el alcance de la construcción y operación de SUDS hacia este objetivo, puede favorecer la protección de hábitats naturales contenidos en el casco urbano de la zona de interés, afectando positivamente a los organismos silvestres que todavía se encuentren en el área intervenida. En este sentido, la ejecución de SUDS puede fomentar

la conservación de plantas y animales (endógenos, introducidos, o migratorios) que estén amenazados por la creciente impermeabilización de áreas naturales; producto del desarrollo urbano.

Urbanismo-paisajismo

El segundo de los objetivos adicionales para los cuales se desarrollan proyectos de SUDS, se concentra en el incremento del valor urbanístico y paisajístico del sitio intervenido. Este objetivo está en concordancia con el objetivo de amenidad mencionado previamente, y aplica usualmente para proyectos públicos de gran envergadura. Sin embargo, en algunos proyectos privados de alto impacto (p. ej. construcción de centros comerciales, centros empresariales e industriales, parques privados, entre otros) es posible integrar este componente de manera coordinada con las entidades municipales encargadas de la zona de interés. Este objetivo procura incentivar el desarrollo urbanístico del sitio intervenido y sus alrededores a partir de la implementación de SUDS, para de este modo mejorar la eficiencia de distribución espacial del área urbana, según las necesidades propias de los habitantes del lugar. A consecuencia de ello, se espera mejorar simultáneamente la percepción paisajística del sitio, al mejorar la armonía visual del lugar en relación con su entorno natural.

Por lo tanto, para priorizar las áreas potenciales a partir de este objetivo es necesario involucrar a cada una de estas variables como: nivel de percepción visual del área, porcentaje de cobertura vegetal, uso del suelo y tipo de norma urbanística que la cubre, entre otros, para de esta manera priorizar aquellas áreas que presenten una carencia urbanística y paisajística, a partir de la información disponible. Ahora bien, en relación a las características de las tipologías recomendadas para llevar a cabo este objetivo, cabe mencionar que estas son usualmente similares a las empleadas para la consecución del objetivo de amenidad. No obstante, para incrementar el componente urbanístico de un sitio determinado, se sugiere el uso de tipologías compactas de práctica construcción que puedan ser implementadas en zonas altamente urbanizadas con limitaciones espaciales significativas (p. ej. vías principales y secundarias, corredores peatonales e intersecciones urbanas). Y por otro lado, en relación a la percepción paisajística del área se recomienda el uso de sistemas de drenaje que involucren infraestructura vegetal de alta visibilidad (e.g plantas ornamentales y árboles de mediana altura).

En este sentido, tipologías con cobertura vegetal como alcorques inundables y zonas de bioretención son las más recurrentes, ya que satisfacen de manera simultánea los dos aspectos de este objetivo. Por una parte, porque estas dos estructuras tienen una alta adaptación y flexibilidad en cuanto a intervención de áreas urbanas restringidas, y por otra parte, porque ambas incorporan infraestructura verde que resulta agradable y tiene el potencial de incrementar el valor paisajístico

40

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

del lugar intervenido. Adicionalmente, estas dos tipologías pueden diseñarse de manera modular, permitiendo así su fácil replicabilidad en el área de estudio en proyectos posteriores.

Renaturalización de cuerpos de agua

Por último, el tercer objetivo adicional, consiste en la renaturalización de cuerpos de agua mediante la implementación de SUDS. Para garantizar este objetivo es necesario abordar de manera conjunta el análisis sugerido para el segundo objetivo de esta metodología (i.e mejorar la calidad de cuerpos de agua receptores). Lo anterior, dado que una de las consecuencias principales de la reducción de las cargas de partículas y contaminantes que llegan a cuerpos de agua receptores, producto del incremento en la calidad del agua, es la recuperación paulatina de las condiciones naturales que éstos tenían antes de ser intervenidos en procesos urbanos. En este sentido, la renaturalización permite mejorar el estado

de aquellos cuerpos de agua (p. ej. quebradas, cauces y riachuelos) que por sus condiciones particulares fueron canalizados e introducidos al sistema de acueducto combinado o pluvial de la ciudad. Por lo tanto, la implementación de SUDS a través de este objetivo, tiene el potencial de incentivar la interacción urbana con estos cuerpos de agua naturales, buscando restaurar la dinámica hídrica natural de la ciudad.

En relación a este último objetivo, las variables sugeridas para priorizar las áreas potenciales son: distancia a cuerpos de agua, parámetros de contaminación del área, tipo de intervención urbana, uso del suelo, entre otros, para de esta manera priorizar aquellas áreas potenciales cercanas a cuerpos hídricos intervenidos. En este sentido, las tipologías recomendadas para este objetivo generalmente son las asociadas para el objetivo de calidad, ya que éstas permitan disminuir las cargas de contaminación del agua que fluye por estos cauces naturales. Sin embargo, sistemas de drenaje como zonas de bioretención, alcorques inundables y cunetas verdes pueden favorecer tanto la calidad del agua como el aspecto natural de los cuerpos de agua, permitiendo renaturalizar paulatinamente los cuerpos hídricos de interés. Asimismo, estructuras de retención de alta magnitud, como pondajes húmedos y humedales artificiales pueden favorecer la renaturalización de cuerpos hídricos y ecosistemas fluviales.

5.7.5. Comparar y seleccionar los sitios más convenientes mediante visitas de campo

Luego de priorizar las áreas potenciales contenidas en cada una de las unidades de análisis, a partir de los objetivos propuestos en el alcance del proyecto, el siguiente paso de la metodología consiste en comparar y seleccionar las áreas potenciales priorizadas más convenientes para la implementación de SUDS. Este proceso de selección se realiza a partir de la información secundaria recopilada, así como también, mediante visitas e inspecciones de campo. En este sentido, estas visitas e inspecciones constituyen un mecanismo de verificación de la información existente y permiten obtener información primaria del área de estudio, que no es posible obtener de ningún otro modo (p. ej. dinámicas e interacciones sociales actuales de la comunidad con el área de interés, estado real del terreno, nivel de desarrollo urbano en la zona, rutas de acceso y salida, entre otros).

Para desarrollar eficientemente este proceso de inspección y comparación, es recomendable diseñar un plan de ruta que optimice las distancias entre cada una de las áreas potenciales a visitar. Por lo tanto se sugiere iniciar las inspecciones de campo con las áreas de mayor extensión, puesto que son éstas las que tienen una mayor probabilidad de ser intervenidas con cualquiera de las tipologías evaluadas. Para proyectos públicos municipales o distritales de gran escala, se recomienda realizar la mayor cantidad posible de visitas en un mismo periodo de tiempo, para de esta manera disminuir

la variación de las condiciones climáticas en las observaciones recopiladas en campo. Por otro lado, para proyectos privados, dado que el marco de referencia del proyecto suele ser más reducido, estas visitas pueden realizarse en corto tiempo y el análisis de las observaciones de campo puede efectuarse en mayor detalle. En campo se recomienda tomar apuntes de las características generales del área evaluada, centrando la atención en aquellos aspectos en los cuales no se tiene mayor información, para de esta manera robustecer los datos que serán utilizados posteriormente en el análisis comparativo de las áreas visitadas.

Ahora bien, se recomienda que el personal a cargo de este tipo de inspecciones de campo sean profesionales con conocimientos técnicos en hidrología urbana, diseño de alcantarillados o afines, que entiendan las dinámicas del drenaje pluvial en áreas urbanas. Asimismo, es muy conveniente integrar en el equipo de profesionales a arquitectos y urbanistas, para de esta manera analizar el potencial que

tiene el área evaluada para incrementar el paisajismo y el urbanismo de la zona, mediante la implementación de SUDS. Incluso en algunos proyectos distritales, municipales o gubernamentales la opinión de representantes políticos y actores sociales, pueden resultar fundamentales para la selección de una u otra área priorizada a partir de criterios socioeconómicos. En este sentido entre mayores sean las perspectivas y la diversidad de aspectos evaluados en campo, mejor será el análisis comparativo de cada una de las áreas en campo.

De esta manera, luego de recopilar y registrar de forma escrita toda la información primaria obtenida en campo de cada una de las áreas priorizadas, es necesario realizar reuniones con los actores involucrados en el desarrollo del proyecto, para comparar y seleccionar cuáles de las áreas visitadas son las más convenientes para la implementación de SUDS. Para este proceso de selección se sugiere plantear diferentes criterios de decisión que permitan optimizar el proceso. A continuación se proponen algunos criterios de decisión, que pueden resultar útiles para llevar a cabo las diferentes comparaciones. No obstante, es importante mencionar que estos criterios no deben abordarse de manera estricta, sino que, pueden servir como guía para la construcción conjunta de criterios propios para proyectos específicos.

En este sentido, se recomienda excluir aquellas áreas en las cuales la información secundaria recopilada, difiera significativamente de las percepciones obtenidas en campo, ya que posiblemente, esta información no es fiable o está desactualizada, lo que puede ocasionar sesgos y errores en la priorización de estas áreas potenciales. Luego de reducir el número de áreas factibles, se sugiere evaluar conjuntamente las áreas resultantes, para de esta manera determinar cuáles de éstas tienen limitaciones o dificultades por motivos técnicos (p. ej. sistema de alcantarillado pluvial inoperante, condiciones climáticas adversas, presencia de pasivos ambientales tóxicos y peligrosos, entre otros), normativos (p. ej. leyes de conservación ambiental o de patrimonio histórico), urbanísticos (p. ej. áreas de reserva vial) o sociales (p. ej. problema recurrentes de orden público, alta incidencia de vandalismo, zonas de invasión ilegal o presencia de grupos armados). En otras palabras se debe analizar qué tan factible puede ser la intervención de las áreas visitadas, a partir de aspectos no considerados hasta el momento, que puedan restringir de manera importante la implementación de SUDS.

Finalmente, una vez descartadas las áreas potenciales que por diferentes problemáticas no son factibles, se sugiere aplicar un criterio adicional para determinar el grado de conveniencia de las áreas inspeccionadas. Este criterio consiste en identificar de las áreas que todavía resulten convenientes, cuáles de ellas son las más viables para ser intervenidas con SUDS, a partir del

42

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

interés propio de cada uno de los actores involucrados en el desarrollo del proyecto. En este sentido se sugiere escoger de manera conjunta las áreas potenciales que resulten estratégicas para la conveniencia de los distintos actores. Así se puede garantizar que la selección de una u otra área potencial favorezca la mayor cantidad posible de beneficios a la mayor cantidad posible de personas involucradas en el proyecto. De esta manera se prevé reducir de manera significativa el número de áreas factibles, seleccionado sólo aquellas en las que es viable la implementación de SUDS.

5.7.6. Realizar pruebas técnicas y comparar la información precedente

En esta etapa de la metodología, se espera que el número de áreas factibles para la implementación de SUDS se encuentre en un valor muy pequeño. Por esta razón, el siguiente paso consiste en realizar pruebas técnicas de campo a las áreas potenciales que todavía resulten factibles del paso anterior, con el fin de comparar los valores técnicos recolectados en un principio con los valores reales de campo,

u obtener nueva información del área de estudio. Esta comprobación de datos es de gran relevancia, ya que la información técnica del área seleccionada será utilizada de manera recurrente en la metodología de selección de tipologías y trenes, presentada más adelante. Adicionalmente, los resultados obtenidos en campo pueden retroalimentar la información secundaria recopilada, para de esta manera reforzar las bases de información técnica para futuros proyectos de implementación de SUDS.

En la literatura académica se encuentra una amplia variedad de pruebas de campo que pueden ser aplicadas al área de estudio. Sin embargo, en muchas ocasiones las limitaciones de tiempo y presupuesto del proyecto, impiden aplicar la totalidad de ensayos posibles. Por esta razón, se sugiere realizar algunas de las pruebas más comunes dentro de este tipo de proyectos, para de esta manera constatar de forma general los datos técnicos existentes. La primera de estas pruebas, está relacionada con el levantamiento topográfico del área de estudio, ya que a partir de los datos obtenidos en campo es posible determinar la pendiente promedio del área de interés, que es uno de los parámetros principales que restringe la implementación de SUDS. Los datos topográficos obtenidos en campo permiten organizar en un plano horizontal los principales elementos del área de estudio, incluyendo las diferencias de altura que posee el relieve del terreno. Adicionalmente, a partir de estas actividades es posible identificar áreas de drenaje en la zona, así como también georeferenciar de manera precisa la ubicación de las obras previstas, para de esta manera tener una mayor precisión en las labores posteriores de diseño y construcción de las diferentes tipologías.

Las pruebas de infiltración del suelo son otro de los ensayos relevante para la selección de sitios, ya que la mayoría de tipologías evaluadas requieren de una adecuada tasa de infiltración para su óptimo funcionamiento. Usualmente estas pruebas se realizan mediante dispositivos prácticos como permeámetros o infiltrómetros de doble anillo, los cuales permiten cuantificar la infiltración vertical del agua en el tiempo, a través de un área de fondo determinada. Asimismo, a partir de este ensayo es posible calcular de manera indirecta la conductividad hidráulica saturada del suelo. Esta prueba se debe realizar en tiempo seco o 24 horas después de un evento fuerte de precipitación, para reducir errores en las mediciones de campo. Del mismo modo, para incrementar la certeza de la información obtenida, se sugiere realizar al menos tres de estas pruebas distribuidas homogéneamente en el área de estudio, para luego determinar un valor promedio.

Ahora bien, las pruebas de campo que determinan el nivel freático del suelo intervenido, también son relevantes para este tipo de proyectos. Usualmente no es aconsejable que el nivel de la tabla de

agua esté a una profundidad muy pequeña con respecto a la superficie del suelo, para de esta manera evitar inundaciones debido a la saturación de éste por infiltración o almacenamiento de agua. Asimismo, estas pruebas permiten identificar el nivel máximo al que se pueden realizar excavaciones en el suelo intervenido, condicionando de esta manera el dimensionamiento de varias tipologías. Estos ensayos de suelo regularmente se efectúan mediante una serie de perforaciones, en donde se mide a través de pozos cilíndricos el nivel freático de manera mecánica o por medio de sondas electrónicas.

Por último, entre la información hidrológica que puede corroborarse en campo, se encuentra la asociada con la precipitación promedio de la zona de interés. Esta información se obtiene mediante la instalación de un pluviógrafo o equipos similares en el área de estudio, con el fin de cuantificar los parámetros de duración, intensidad y frecuencia de los eventos de lluvia que allí se desarrollan. De esta manera se sugiere capturar al menos cinco eventos de precipitación, para luego comparar y analizar en detalle los resultados obtenidos con los valores reportados en la información secundaria.

Entre mayor sea el número de eventos medidos, mayor será el nivel de confianza de los resultados. Adicionalmente, a partir de la información recolectada en esta prueba y de las áreas de drenaje delimitadas en el levantamiento topográfico, es posible determinar de manera general el volumen bruto de escorrentía (sin considerar pérdidas) que se generaría en la zona de interés. En este sentido, a partir de este volumen es posible calcular de manera general la magnitud que tendría la intervención del área de estudio, por lo que se puede constituir así un criterio de decisión adicional para optar por una u otra área potencial para la intervención con SUDS.

Algunas otras pruebas de campo en el terreno (p. ej. pruebas de transmisividad, ensayos de permeabilidad y granulometría, entre otros) pueden ser útiles para comparar la información técnica del área de estudio. Sin embargo, es necesario mencionar que la rigurosidad y el detalle de los resultados de estos ensayos de campo dependerán en gran medida del alcance y tipo de proyecto. De esta manera, luego de realizar las pruebas respectivas en cada una de las áreas potenciales resultantes del paso anterior, es posible seleccionar aquellas en las cuales la información obtenida en campo es concordante y apropiada para la implementación de SUDS. De esta forma, el grupo de áreas factibles se reduce una vez más, pero ahora, cada una de las áreas resultantes de este paso se considerará como sitio viable de intervención. El proceso de selección definitiva de uno o varios de estos sitios se desarrollará en el siguiente paso de la presente metodología.

5.7.7. Seleccionar el sitio óptimo de intervención

El último paso de este proceso de selección consiste en elegir, de los sitios viables obtenidos del paso anterior, cuáles de ellos son los más apropiados para la implementación de SUDS. En algunos casos, luego de filtrar el grupo de áreas potenciales para cada uno de los pasos de esta metodología, sólo resultará un único sitio factible, el cual será escogido de manera directa como el sitio más apropiado para la implementación de SUDS. No obstante, en los casos en los cuales resulten más de un sitio posible, es necesario realizar nuevamente una serie de reuniones con los principales actores involucrados en el desarrollo del proyecto, para que de forma conjunta se seleccione el sitio más apropiado para la intervención este tipo de sistemas de drenaje. En este sentido, es importante aclarar que no debe seleccionarse un único sitio, si el proyecto así lo requiere pueden escogerse el número de sitios que el alcance del proyecto establezca. De esta manera, se elegirá el(los) sitio(s) que cumpla(n) con todos los requerimientos abordados en esta metodología de selección, garantizando así que el resultado en este proceso sea el producto de un análisis técnico riguroso así

44

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o
tecnologías de sistemas urbanos de
drenaje sostenible (SUDS) que más se
adaptan a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

como también de juicios y evaluaciones conjuntas de todos los actores involucrados en el desarrollo del proyecto.

5.7.8. Verificar si el sitio seleccionado satisface el alcance propuesto

Este paso de verificación, constituye el mecanismo de decisión que cierra la metodología de selección de sitios. En este sentido, se debe determinar si el sitio seleccionado como más apropiado del paso anterior, verdaderamente cumple con el alcance planteado en el proyecto. Es necesario verificar que las condiciones y características (técnicas, normativas, políticas, ambientales y socioeconómicas) de éste posibiliten la consecución de los objetivos planteados en dicho alcance. Generalmente, este paso de verificación no es necesario debido a la alta rigurosidad aplicada en los diferentes pasos previos de comparación y comprobación. Sin embargo, en proyectos locales o de nuevos desarrollos, en donde no se cuenta con información suficiente, este último paso puede resultar fundamental para evitar errores futuros en la selección de tipologías y tipos. Por esta razón, si el sitio seleccionado cumple completamente los requerimientos del alcance propuesto, éste se elige de manera definitiva como el

sitio óptimo de implementación de SUDS, con lo cual se finaliza este proceso de selección de sitios, para que de forma consecutiva se inicie el desarrollo de la metodología de selección de tipologías y trenes, tomando como base el sitio óptimo de intervención generado. En caso contrario, es necesario volver al segundo paso de esta metodología, para replantear el alcance de la intervención y determinar nuevamente si la implementación de SUDS constituye la alternativa más adecuada.

5.8. Caso de estudio: Bogotá D.C

A continuación se presentará de manera genérica el desarrollo de los primeros cuatro pasos de esta metodología de selección de sitios, aplicada al caso de estudio de Bogotá, Colombia, para de esta manera ejemplificar de manera concreta cómo se siguió esta metodología en las etapas más importantes. Este caso de estudio se enmarca dentro del proyecto: “Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C”. Desarrollado por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes en conjunto con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB) y la Secretaria de Medio Ambiente (SDA), junto con el apoyo del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), el Instituto Distrital de Recreación y Deporte (IDRD) y el Jardín Botánico de Bogotá, entre otros.

5.8.1. Delimitar el área de estudio

Siguiendo el esquema de la metodología presentado desde un inicio de este capítulo (ver Figura 3), el primer paso de este proceso de selección consiste en delimitar el área de estudio mediante un marco de referencia y cierto número de unidades de análisis. En este sentido, dado que el proyecto mencionado abarca la totalidad del perímetro urbano de la ciudad, éste se eligió como el marco de referencia en el cual se iba a desarrollar la selección de sitios. Ahora bien, en cuanto a las unidades de análisis, se seleccionaron los polígonos ya definidos de las Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGAs), puesto que estas unidades cubren la totalidad del área de Bogotá, y están divididas a partir de información común de manejo y operación del sistema de alcantarillado en la ciudad. En concordancia sólo se evaluaron las UGAs contenidas en el perímetro urbano de la

ciudad. La Figura 4 presenta el mapa en donde se puede observar tanto el marco de referencia como las unidades de análisis escogidos para este primer paso.

Figura 4. Mapa de marco de referencia y unidades de análisis

5.8.2. Establecer el alcance y determinar la conveniencia de los SUDS

Ahora bien, en cuanto al alcance de la implementación de este proyecto se debe mencionar que éste tiene como finalidad principal: determinar, priorizar y seleccionar las tipologías más apropiadas para optimizar el manejo de la escorrentía pluvial en el área urbana de Bogotá D.C. en sus diferentes localidades, entornos urbanos y usos del suelo. En este sentido, los objetivos enmarcados en este alcance están orientados hacia la búsqueda de una adecuada calidad del agua de la escorrentía que drena hacia ríos, quebradas y humedales, que promueva el aprovechamiento del agua lluvia para usos no potables y paisajísticos y que tienda a condiciones pre-urbanas del ciclo hidrológico para prevenir y/o mitigar inundaciones. Por esta razón, para este proyecto particular se establecieron dos objetivos principales para la implementación de SUDS: (1) manejar volúmenes y picos de escorrentía, y (2) mejorar la calidad del agua de escorrentía que llega a cuerpos de agua receptores. Adicionalmente, se incluyeron de manera secundaria los tres objetivos adicionales de: amenidad, urbanismo y paisajismo, y re-naturalización de cuerpo hídricos, como elementos complementarios en la toma de decisiones de selección de sitios. Finalmente, dado que el proyecto está totalmente encaminado al desarrollo de SUDS, la conveniencia de este tipo de alternativa de drenaje es completamente adecuada para este proyecto particular.

5.8.3. Recopilar información e identificar áreas potenciales de intervención

Luego de definir el alcance y los objetivos, se recopiló toda la información secundaria existente en la

ciudad para luego identificar las áreas potenciales para la implementación de SUDS. Dado al carácter distrital del proyecto, en este paso de la metodología se determinó que las áreas potenciales a analizar constituirían aquellos espacios públicos disponibles de la ciudad, en donde fuera posible realizar una intervención con este tipo de estructuras de drenaje. En la Tabla 1, se presentan las principales bases de información (fuente, año, formato y observaciones) que fueron evaluadas para la priorización posterior de estas áreas potenciales.

Tabla 1. Información recopilada para el desarrollo del análisis espacial en Bogotá

**CATEGORÍA TIPO DE
INFORMACIÓN FUENTE AÑO FORMATO OBSERVACIONES**

Subcuencas EAB 2012 Polígono La información reporta 137 subcuencas sanitarias y 45 pluviales, contiene información referente a: área y cuerpo de agua al que drenan.

**Unidades de gestión y
planeación**

Unidades de
Gestión de
Alcantarillado
(UGAS)
Unidades de
Planeamiento Zonal (UPZ)
Universidad

de los Andes 2012 Polígono SDP 2013 Polígono

Se reportan 485 unidades de gestión de alcantarillado, y contiene información de: tipo de UGA (separada, combinada, rural y cárcava), cuenca y subcuenca pluvial y/o sanitaria a la cual pertenece.

La información reporta 114 Unidades de Planeamiento Zonal, cuenta con información específica sobre los códigos y nombre de identificación de cada UPZ, localidad, zona a la que pertenece y decreto que la ampara.

Uso Catastral del Suelo

Lotes y
SDP, EAB, SDM
(IDECA)

2015 Polígono Incluye los siguientes usos del suelo: comercio y servicios, dotacional, industrial, residencial, áreas protegidas, central y minería.

La cobertura de lotes describe todos los lotes a nivel catastral dentro del perímetro urbano, mientras que la cobertura de construcciones contiene aquellas zonas de los lotes que se encuentran desarrolladas. Cada uno de

Clasificación del Uso del Suelo

Construcciones IDECA 2013 Polígono Zonas de Expansión SDP 2013 Polígono

los lotes y construcciones contiene como información el área y el código catastral, así como las construcciones cuentan con información sobre el número de pisos y/o sótanos que posee.

La cobertura contiene información específica de valores de área de zonas urbanizadas, zonas de urbanización irregular y zonas de expansión. Sin embargo, debido a la rápida urbanización de la ciudad esta información puede encontrarse desactualizada y algunas zonas que se definen en la capa como zonas de expansión ya se encuentran urbanizadas.

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o tecnologías de
sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)
que más se adapten a las condiciones de la

ciudad de Bogotá D.C.

CATEGORÍA TIPO DE

INFORMACIÓN FUENTE AÑO FORMATO OBSERVACIONES

La información disponible sobre áreas protegidas contiene sobre el perímetro y área, tipos de suelo, tipo de área protegida (Metropolitano, Ecológico del sistema orográfico, Ecológico distrital y Nacional natural), Áreas Protegidas SDP 2013 Polígono Canales EAB 2007 Línea

tipo de reserva (Forestal Distrital y Forestal nacional), clase (Áreas de manejo especial nacional y santuario distrital de fauna-flora), acto administrativo que la cubre y el nombre de cada área declarada como protegida.

Esta capa presenta el conjunto de canales presentes en el casco urbano de la ciudad, en su mayoría paralelos a la configuración vial de Bogotá o en casos más específicos por la forma de cuerpos de agua cercanos.

Ríos EAB 2007 Línea Representa la ubicación de los cuatro ríos principales de la ciudad: el río Tunjuelo, el Torca, el Salitre y el Fucha.

Esta capa compila la información referente al sistema de drenaje natural

Sistema de Drenaje Natural

Sistema de Alcantarillado Construido

Quebradas EAB 2007 Línea Humedales EAB 2007 Polígono

Cuerpos de Agua EAB 2007 Polígono

Alcantarillado

Pluvial EAB 2014 Línea

Alcantarillado

Sanitario EAB 2013 Línea

Capacidad del

Sistema SDP 2013 Polígono

de la ciudad. La tabla de atributos de esta capa comprende la siguiente información: nombre de la quebrada, longitud y acto administrativo que la contempla.

Contiene información de 15 humedales en Bogotá. Únicamente se incluye la identificación del humedal y el área de los polígonos que lo conforman.

En esta capa se encuentran los datos referentes a los cuerpos de agua en general que se encuentran tanto en la ciudad como a sus alrededores, ya sean humedales, lagos, embalses, canales, meandros y ríos, al igual que el área de estos.

Esta cobertura comprende aproximadamente 2,400 km de red local distribuida en las zonas, norte, occidental y sur de la

ciudad. Contiene información sobre tipo de tubería, fecha de instalación y cotas de nivel. Esta información describe la cobertura de alcantarillado a nivel local y troncal. Se reporta información concerniente a diámetros de tubería, fechas de instalación, estado de calidad estructural y longitud de cada tubería.

Contiene los rangos de capacidad del sistema de alcantarillado aplicado para una zonificación a nivel de UGAS. Los rangos son: sin servicio, crítica, restringida, moderada, alta y suelo de protección.

48

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o tecnologías de
sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)
que más se adapten a las condiciones de la

ciudad de Bogotá D.C.

CATEGORÍA TIPO DE

INFORMACIÓN FUENTE AÑO FORMATO OBSERVACIONES

Contiene información sobre las áreas de la ciudad con amenaza de

Amenazas de

Inundación SDP 2013 Polígono

Zonas de

Encharcamiento IDIGER 2014 Raster

inundación fluvial alta, media y baja. En su mayoría, ubicadas a lo largo del costado occidental y norte de la ciudad, en las rondas del río Bogotá y a lo largo de cuerpos de agua como los humedales Juan Amarillo, y Córdoba y el río Molinos.

La información disponible destaca en la capa aquellos puntos más importantes en cuanto a encharcamientos del sistema.

Estos se definen según la proporción de llamadas de emergencia que se establecen en las zonas más propensas a presentar encharcamientos por diferentes razones, que incluyen sobrecarga del sistema de drenaje.

Puntos Críticos del Sistema

EAB (IEH

GRUCON) 2011 Punto

Esta información define los puntos críticos del sistema de alcantarillado. Para esto se detalló un análisis en el que se incluyeron factores como la probabilidad de falla y la evaluación del riesgo en diferentes zonas. Para esta información se localizan 160 parques de los cuales 159 están dentro del perímetro del casco urbano y uno (Parque San Rafael) ubicado

Infraestructura y espacio público

Parques SDP 2013 Polígono

Plazas SDP 2015 Polígono Andenes EAB 2013 Polígono

Malla Vial SDP 2013 Línea

Arbolado SDA 2005 y

2014 Punto

en La Calera. Sin embargo, ya que esta capa solamente incluía parques de un tamaño considerable, se tuvo en cuenta una capa adicional que contaban con parques de menor tamaño.

Esta cobertura incluye la representación geográfica de 91 plazas distribuidas en la ciudad. Para cada plaza se presenta información referente a: nombre, perímetro, área, tipo de plaza, localidad y dirección específica donde se ubica.

La información obtenida para andenes cuenta con una tabla de atributos que incluye como información relevante los códigos de identificación de cada zona definida como andén.

Contiene la cobertura completa en el área urbana de la ciudad y comprende información para cada tramo de vía que incluyen: tipo de vía (Carrera, Diagonal, Calle, Avenida-Carrera, Avenida-Calle y Transversal), nombre de la vía y códigos de la localidad y barrio al que pertenece.

Se presenta información de cada árbol de la ciudad, incluyendo: nombre de la especie, altura total, código de la UPZ en la que se encuentra y la fecha en que fue inventariado, que varía entre el año 2005 y el año 2014.

49

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería
Investigación de las Tipologías y/o tecnologías de
sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)
que más se adapten a las condiciones de la

ciudad de Bogotá D.C.

CATEGORÍA TIPO DE

INFORMACIÓN FUENTE AÑO FORMATO OBSERVACIONES

Modelo de
Elevación Digital
Universidad

de los Andes 2011 Raster

Esta información contiene las curvas de nivel para toda la ciudad, que permite análisis topográficos para el cálculo de pendientes y direcciones de flujo.

Se recopiló información de estudios reportada en la base de datos

Características Físicas del

Suelo

Taza de Infiltración Universidad

de los Andes 2015 Raster

SISGEO. Se desarrolló un mapa de permeabilidad del suelo a partir de 2973 sondeos y análisis del suelo. El procesamiento de la capa se especifica en el capítulo de Análisis de Espacio Público. Información concerniente a la profundidad del nivel freático multianual

Profundidad

Freática

Condiciones

Universidad

de los Andes 2015 Raster

INGETEC

S.A

de la ciudad a lo largo los años comprendidos entre 1969 y 2011. El procesamiento de la capa se especifica en el capítulo de Análisis de Espacio Público.

Se utilizó la información desarrollada por INGETEC S.A para el cálculo de las curvas IDF (Intensidad Duración Frecuencia), y a partir de estas se

Climáticas Precipitación

Universidad de los Andes

2014 Raster

desarrolló una cobertura raster para calcular la profundidad máxima de precipitación para una duración de 6 horas y un periodo de retorno de 10 años.

Adicional Ortofoto EAB 2009 Raster Esta información permite realizar observaciones específicas de la ciudad

Información para su posterior digitalización.

Ahora bien, las unidades de análisis (UGAs) establecidas desde un inicio, se cruzaron con la mayor cantidad de información técnica de las coberturas existentes, para de esta manera integrar a cada una de ellas la información específica más completa posible. Luego, a partir de la información recopilada de infraestructura y espacio público, se construyó una cobertura conjunta de espacio público disponible para la implementación de SUDS. Esta cobertura se compone de andes y separadores, corredores verdes y verde-azules, plazas, parques, zonas verdes, y otras áreas complementarias. Es importante aclarar que no toda la bases de información reunidas estaban actualizadas, e incluso en algunos casos éstas presentaron información incompleta. Por esta razón, no se recomienda abordar el mapa expuesto en la Figura 5 como manual de áreas de intervención, antes bien, se sugiere que éste sea analizado a manera de ejemplo orientador para futuros proyectos de implementación de SUDS. De este modo, a partir de ambas coberturas: (1) UGAs con toda la información disponible y (2) espacio público potencial, se realizó la priorización por objetivos, presentada en el paso subsiguiente.

Figura 5. Mapa de espacio público de la ciudad de Bogotá

5.8.4. Priorizar áreas por objetivo de interés

Una vez obtenidas las dos coberturas necesarias para realizar la priorización, se analizó para cada uno de los objetivos establecidos en el alcance, cuál era la información necesaria para seleccionar o excluir una u otra UGA en particular. En este sentido, se generó un mapa de UGAs priorizadas para cada uno de los objetivos de interés, combinando todos los aspectos relevantes a cada objetivo. Luego se cruzaron los mapas resultantes de los objetivos principales (Manejar la escorrentía y mejorar la calidad de ésta), para de esta manera construir un mapa conjunto y definitivo de UGAs priorizadas. Posteriormente, este mapa se intersectó con el mapa de espacio público potencial generado en el paso anterior, para generar finalmente el mapa de áreas potenciales priorizadas por objetivos de interés. A continuación se presenta de manera general los aspectos

involucrados para la selección o exclusión de UGAs, para cada uno de los objetivos mencionados, junto con el mapa resultante de cada priorización. Para de esta manera finalizar con el mapa definitivo de priorización conjunta de áreas potenciales por objetivos de implementación.

Manejo de escorrentía

Para priorizar las unidades de análisis a partir del objetivo de manejo de escorrentía se involucraron cuatro coberturas de información en donde se incluyen los siguientes aspectos: capacidad del sistema de alcantarillado, zonas de encharcamiento, puntos críticos y zonas de inundación fluvial. La capacidad del sistema es una medida de la capacidad instalada para la recepción de volúmenes de escorrentía; por su parte, las zonas de encharcamiento y los puntos críticos representan UGAs con problemas actuales relacionados con el manejo de la escorrentía. Por último las zonas de inundación fluvial son aquellas con alto riesgo de inundación por desbordamiento de los cuerpos receptores. Para cada una de las cuatro coberturas antes descritas se proponen categorías de 1 a 4, donde 4 es el estado más crítico. De esta manera, integrando la información derivada de las cuatro coberturas se desarrolló el mapa conjunto de UGAS priorizadas por objetivo de manejo de escorrentía (ver Figura 6).

Figura 6. Mapa de Priorización Conjunta de UGAS por el objetivo de manejo de escorrentía

Calidad de cuerpos de agua

Para priorizar las unidades de análisis, a partir del objetivo de mejorar la calidad del agua de escorrentía que llega a los cuerpos de agua receptores, se abordaron tres aspectos: la calidad del agua de ríos, quebradas y humedales de la ciudad. El enfoque general de este proceso, consistió en determinar las condiciones de calidad para cada uno de estos cuerpos de agua, y relacionar las UGAS aferentes a éstos mismos. Para este análisis se involucraron cuatro determinantes comunes de calidad en los tres tipos de cuerpos hídricos evaluados: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total (NT) y Fósforo Total (FT). De esta forma se logró identificar aquellas UGAS que pueden tener un mayor efecto positivo (de implementarse SUDS) sobre la calidad de los distintos cuerpos de agua. Ahora bien, siguiendo el procedimiento del objetivo anterior, a cada UGA se asignó un valor entre 1 y 4, donde 4 es el estado más crítico. Por lo tanto, una vez obtenidos los tres diferentes mapas de calidad, se realizó la priorización conjunta de los tres cuerpos de agua, con el fin de obtener un mapa priorizado definitivo para este objetivo en particular. La Figura 7, presenta el resultado final de este procesamiento.

*Figura 7. Mapa Conjunto de Clasificación de UGAS por Rangos de Calidad de ríos y humedales
Amenidad*

Ahora bien, la priorización para el objetivo de amenidad fue el resultado de diálogos y reuniones entre actores y entidades involucradas en el desarrollo del proyecto, en relación a los criterios de escogencia de los sitios más apropiados para la implementación de SUDS. En este sentido se intentaron seleccionar aquellas UGAs en donde el impacto social positivo fuese más relevante, a partir de la intervención con este tipo de sistemas de drenaje. Los aspectos que se consideraron para este propósito fueron las coberturas de parques, zonas verdes y arbolado de la ciudad. A esta información se integraron los resultados obtenidos de un estudio

del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes, en el que se valoraban los servicios ambientales, sociales y económicos de las áreas verdes de la ciudad (Rincón, 2015). La Figura 8, presenta el mapa final de esta priorización, el cual está clasificado en 6 categorías relevantes. Éstas son el resultado de las distintas combinaciones encontradas a partir del grado de satisfacción (A: alto M: medio y B: bajo) de los tres servicios evaluados en cada UGA. En este sentido se consideraron como unidades de análisis prioritarias aquellas con la calificación más baja en estos tres aspectos (i.e BBB). De esta manera este mapa ofrece un panorama más amplio de la interacción social que tendría la inclusión de SUDS en las UGAs prioritarias, por objetivo de amenidad, en la ciudad de Bogotá.

Figura 8. Mapa de priorización de UGAs a partir del análisis ambiental, social y económico de la amenidad Urbanismo y paisajismo

Para priorizar las unidades de análisis a partir del objetivo de urbanismo y paisajismo en Bogotá, se utilizó como aspecto de selección el desarrollo de nuevos proyectos de renovación urbana en la ciudad. La información correspondiente a estos proyectos fue recopilada a partir de diferentes fuentes, que incluyen la Empresa de Renovación Urbana, la Secretaría Distrital de Planeación, y algunos decretos vigentes de la Alcaldía de Bogotá. A partir de esta información se desarrolló una cobertura de proyectos de renovación urbana, que luego fue cruzada con la cobertura de unidades de análisis, para facilitar la comparación visual de éstas con respecto a los otros objetivos evaluados. De esta forma, para otorgar un valor de priorización a cada unidad, se cuantificó la totalidad del área ocupada por los proyectos de renovación urbana en cada UGA, con lo cual las áreas prioritarias constituirían las de mayor extensión, dado que éstas tendrían una mayor probabilidad de ser intervenida con SUDS.

Cabe resaltar que la cobertura de proyectos de renovación generada, no pudo contar con la totalidad de proyectos a en la ciudad, debido a que no existe un inventario total de éstos. Sin embargo, es claro que la mayor parte de estos proyectos involucran el desarrollo hacia el occidente de Bogotá, y es importante destacar el hecho de que gran parte de las zonas que contienen una alta área de intervención se encuentran en UGAS al margen del río Bogotá. De esta manera, la cobertura resultante de este objetivo puede ser de utilidad para la selección final de sitios, debido a que los proyectos de renovación urbana representan una buena oportunidad para integrar la implementación de SUDS desde el principio de este tipo de proyectos. El mapa de la priorización de UGAs a partir de este objetivo se presenta en la Figura 9.

*Figura 9. Área de proyectos de renovación urbana cuantificada por UGA
Renaturalización de cuerpos de agua*

Por último, con respecto al objetivo de renaturalización de cuerpos de agua, se tuvieron en cuenta los aspectos relacionados con los puntos de canalización e integración de ríos y quebradas al sistema de drenaje convencional, y la ubicación de corredores verdes y verde-azules en la ciudad, para de esta manera identificar las zonas potenciales para el restablecimiento de las condiciones naturales de los cuerpos hídricos existentes, a partir de la implementación de SUDS. La determinación de puntos de canalización de ríos y quebradas es relevante, ya que gran parte del agua que proviene de éstas, con calidad relativamente buena, se mezcla con corrientes de agua contaminada. Por lo tanto, la implementación de SUDS podría promover el restablecimiento de las condiciones originales de estos cuerpos hídricos, incentivando así la preservación urbana de estos cauces naturales al interior de la ciudad. Por otra parte, los corredores verdes y verde-azules son zonas paralelas o cercanas a un río, quebrada o canal. Que por sus condiciones naturales tienen el potencial de ser intervenidos con este tipo de estructuras de drenaje, para de esta manera incentivar la

renaturalización y protección de estos cuerpos de agua. Adicionalmente estas zonas podrían ser incluidas como parte de los sistemas de drenaje conectadas a ríos principales, o como mecanismo de control de calidad de quebradas afectadas por escorrentía difusa.

Para este objetivo no se realizó una priorización por UGAs, ya que la información procesada fue construida, en su mayoría, a partir imágenes satélites. Estas observaciones son subjetivas, y por lo tanto son proclives a fallas y equivocaciones, incrementando así el margen de error de los resultados obtenidos. Por esta razón el mapa generado, pasó a integrar uno de los componentes adicionales a considerar en etapas posterior de decisión para seleccionar una u otra área potencial. La Figura 10 presenta el mapa obtenido para este objetivo, en donde se identifican los aspectos mencionados.

Figura 10. Mapa de identificación de los puntos de entrada de quebradas al sistema de drenaje construido y a los principales ríos presentes en Bogotá

5.8.5. Priorización conjunta de objetivos

Ahora bien, luego de realizar el análisis particular para cada uno de los objetivos identificados, se estableció que la priorización conjunta se haría a partir de los dos objetivos principales de este proyecto: (1) manejar volúmenes y picos de escorrentía, y (2) mejorar la calidad del agua de escorrentía que llega a cuerpos de agua receptores. Esta valoración conjunta fue posible, ya que las dos coberturas individuales presentaban la misma escala de calificación de prioridad. De esta manera, luego de priorizar conjuntamente las unidades de análisis a partir de ambos objetivos, se obtuvo finalmente el mapa de UGAs prioritarias a partir de los objetivos de interés (ver Figura 11).

Figura 11. Priorización conjunta de UGAs por manejo de escorrentía y calidad de agua de ríos, quebradas y humedales

Al obtener la cobertura de priorización conjunta de UGAs (ver Figura 11), ésta se intersectó con la cobertura de espacio público potencial para la implementación de SUDS (ver Figura 5), para generar el mapa definitivo de áreas potenciales de intervención a partir del análisis de prioridad conjunto por objetivos de interés, presentado en la Figura 12. En este sentido, el conjunto total de áreas factibles se redujo significativamente, seleccionando sólo aquellas áreas potenciales que se encontraban al interior de las UGAs prioritarias, en donde el impacto de la implementación de SUDS resultaría más importante. En este sentido se estaría garantizando que la intervención con estructuras de drenaje sostenible en estas áreas, promovería los beneficios asociados a los objetivos evaluados. De esta manera a partir de esta selección de áreas potenciales, fue posible continuar con los pasos subsiguientes de comparación y selección del sitio más conveniente para la implementación de SUDS en el proyecto mencionado.

Figura 12. Mapa de áreas potenciales priorizadas por objetivos de interés.

Para concluir con las recomendaciones de este capítulo, es necesario mencionar que cada proyecto es único y presenta condiciones particulares, por lo que, se sugiere seguir la presente metodología como orientación y no como normativa para el desarrollo futuro de proyectos similares. El éxito de este proceso de selección de sitios consistirá en la adecuada definición del alcance y los objetivos de implementación del proyecto, así como también del buen manejo de la información que se encuentre disponible en el área de interés. Adicionalmente, la coordinación e integración de todos los actores involucrados en el desarrollo de este tipo de proyectos, será fundamental para tomar las mejores decisiones a lo largo del proceso de selección, y evaluar de manera crítica las recomendaciones y sugerencias existentes en la literatura, con lo cual, se espera seleccionar de la forma más conveniente el sitio óptimo para la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible.

3. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE TIPOLOGÍAS Y TRENES DE SUDS

5.9. Introducción

Durante los últimos años el proceso de selección de las tipologías SUDS de un tren de manejo de aguas lluvia ha sido abordado a través de diferentes metodologías, las cuales varían de acuerdo a los criterios de diseño considerados. Establecer los criterios de diseño desde el inicio de éste proceso garantiza que ningún componente del tren de manejo de agua lluvia tendrá un papel secundario frente a otros requerimientos del proyecto. Un criterio de diseño es un conjunto de condiciones que debe cumplir el sistema a diseñar y en las cuales están de acuerdo el constructor, los encargados del diseño y planeación, y las autoridades competentes. Se debe tener en cuenta que la selección de los componentes de un tren de manejo de sistemas de drenaje urbano sostenible es un proceso multidisciplinario, que no sigue una secuencia directa y siempre se debe complementar con una identificación de las limitaciones propias de cada sitio.

En este sentido, es necesario involucrar toda la información existente de las variables que condicionen las áreas priorizadas, para de esta manera comparar y elegir cuales son las tipologías que mejor se ajustan a las características preexistentes de estas áreas. Una vez se hayan depurado las tipologías posibles en un grupo más reducido, se seleccionan de éste aquellas que por su funcionamiento satisfagan en mejor medida el objetivo establecido. Luego de establecer las tipologías más apropiadas, se deben integrar las restricciones propias de cada una de éstas a las áreas establecidas como prioritarias, para de esta manera conocer en cuales es posible implementar una u otra tipología escogida. Finalmente, una vez establecida la tipología, es posible determinar la ponderación o gradación del área, para identificar en que sector de ésta es más adecuado realizar la implementación de la tipología seleccionada.

A partir de los resultados generados en el Producto 2 del proyecto: “Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.”, se escogieron las siete tipologías de SUDS consideradas como más factibles a implementar en la ciudad de Bogotá. Las tipologías seleccionadas en orden de aplicabilidad fueron: alcorques inundables, tanques de almacenamiento, zonas de bioretención, cunetas verdes, cuencas secas de drenaje extendida, zanjas de infiltración y pavimentos porosos.

La selección de la tipología más adecuada para un sitio específico es afectada por los diferentes objetivos que se desean alcanzar en la implementación. En este sentido, para áreas urbanizadas usualmente son de mayor relevancia aspectos de cantidad y calidad de agua, sin descuidar aspectos sociales, urbanos y de amenidad. Por otro lado, para áreas pequeñas con limitaciones espaciales significativas, serán más relevantes aspectos de calidad y paisajismo local. Para éste proceso se requiere del análisis comparativo de variables tales como la remoción de contaminantes, la atenuación de picos y volúmenes de escorrentía, así como también costos y tipo de mantenimiento requerido por cada tipología de SUDS.

La metodología propuesta para seleccionar tipologías y trenes de SUDS se presenta en la Figura 13. Ésta inicia con el sitio seleccionado para la implementación de SUDS, resultado de la metodología presentada en el Capítulo de Selección de Sitios. El sitio óptimo de intervención obtenido, ya cuenta con toda la información técnica disponible de tipo secundario o resultado de inspecciones y ensayos de campo como: topografía, pruebas de infiltración, mediciones de nivel freático y distancia a cimientos, entre otras.

Adicionalmente, en el sitio seleccionado se cuenta con algún tipo información complementaria de tipo ambiental, social y económico. Ahora bien, si el sitio identificado es de gran tamaño, allí también se podrá encontrar una clasificación interna de las áreas viables de intervención dentro de éste como: parques, vías (bajo flujo vehicular), separadores viales, andenes, parqueaderos, entre otros. Esta discriminación interna del sitio provee una selección preliminar muy general de las tipologías más adecuadas a implementar, para de esta manera iniciar el proceso de comparación, evaluación y selección de las tipologías y trenes más adecuados para el sitio a intervenir. Este proceso de selección se presentará a continuación en este capítulo.

Figura 13. Metodología de selección de tipología
Tabla: Ver Tabla 3 y la Tabla 4.*

61

A continuación se presentaran las recomendaciones generales de ubicación de las siete tipologías evaluadas en esta guía de diseño. Usualmente cada una de éstas presenta restricciones particulares de construcción y operación, que limitan las posibilidades de su localización e implementación. En este sentido, estas recomendaciones constituyen uno de los primeros criterios de selección, para optar por una u otra tipología, dependiendo del sitio seleccionado para la intervención de SUDS. La Tabla 2 resume las sugerencias de localización más recurrente que se encuentran en la literatura, para casos en los cuales se quiera intervenir áreas potenciales ya desarrolladas o urbanizadas. Por otra parte, para proyectos de nuevos desarrollos, en los cuales se

quiera involucrar SUDS desde la planeación misma del proyecto, es conveniente analizar de manera previa cual es el objetivo principal que tendría la implementación, para de esta manera evaluar el área disponible y decidir cuál es la tipología más conveniente para la consecución de éste, a partir del análisis comparativo de las tipología más adecuadas.

Tabla 2. Preselección de tipologías de SUDS de acuerdo con la selección de áreas potenciales

Tipologías	Áreas potenciales
Parques	x x x x x
Plazas	x x x x
Andenes	x x x x
Vías (flujo vehicular bajo)	x x
Zonas comerciales	x x x
Zonas industriales	x
Zonas institucionales	x x x
Jardines domiciliarios	x x x
Parqueaderos	x x x x x
Separadores viales	x x x x x x
Corredores verdes	x x x x

Usualmente las zonas elegidas para la intervención de SUDS son aquellas que presentan condiciones naturales o poco urbanizadas, ya que éstas son las que probablemente aún presenten condiciones naturales de drenaje. Esto constituye una ventaja de intervención frente a zonas impermeables, en donde la alta compactación del suelo y la contaminación del mismo, impide por completo el drenaje de escorrentía de eventos de precipitación.

Una vez realizada esta primera pre-selección, se sugiere discriminar el sitio de implementación según el criterio del proyecto, es decir se debe determinar si las áreas disponibles son de espacio público o privado. Para espacio público se recomienda revisar el mapa de tipologías adecuadas de la ciudad de Bogotá, resultado del Producto 2 del proyecto: *“Investigación de las tipologías y/o*

tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D. C.”. En éste es posible ubicar el sitio de interés en una cobertura de espacio público de la ciudad, para de esta manera identificar los diagramas de

(cm/h) Mínimo 1.3³ 0.7⁷ 1.3³ 0.7¹⁰ 1.3³ 0.7²

Distancia a cimientos** Mínimo 49 612 612 612 103 62 ⁶ Urban Drainage and Flood Control District, 2010

X No se presenta información disponible

⁷ Center for Watershed Protection, 2000

¹ Geosyntec consultants, 2010

⁸ Clean Water Services, 2009

² Riverside County Flood Control and Water Conservation District, 2011

⁹ Toronto and Region Conservation Authority, 2010

³ City of Edmonton, 2011

¹⁰ Department of Defense - USA, 2010

⁴ CIRIA, Norfolk County Council, 2007

¹¹ City of Los Angeles, 2011

⁵ City of Santa Rosa, 2011

¹² Virginia Department of Transportation, 2013

* La tasa de infiltración deberá ser estimada por medio de pruebas de infiltración realizadas en el sitio donde se desea implementar la tipología. Debido a la variedad de suelos presentes en la ciudad de Bogotá, no se considera apropiado estimar una tasa de infiltración promedio pues este es un factor importante en el desempeño de las tipologías por lo que es necesaria una estimación precisa de la misma.

** Distancia a cimientos corresponde a la distancia mínima recomendada entre el sitio de implementación de la estructura y los cimientos de fundación de estructuras aledañas como edificaciones y vías (Virginia Department of Transportation, 2013).

Tabla 4. Restricciones asociadas a geometría del diseño de 4 tipologías propuestas

Parámetro	Tipo de Restricción Por Valor	Cuenca Seca de Drenaje Extendida
	Área (m ²)	Mínimo 45*
	Relación L/W	Mínimo 02:11
	Ancho (m)	Mínimo 52
	Largo (m)	Mínimo 9*

¹ Wisconsin Department of Natural Resources, s.f.

² Bowling Green, 2011

* Valores calculados

Al realizar la preselección de tipologías se inicia el proceso de elección de las tipologías más adecuadas por medio de la metodología expuesta en el numeral 5.10. Con las tipologías más adecuadas se realiza la conformación del tren de tratamiento por medio de la metodología expuesta en el numeral 5.11, para de esta manera seleccionar en el sitio óptimo, las tipologías o la configuración de éstas, más adecuada para garantizar los objetivos planteados en el alcance del proyecto. Estas dos metodologías mencionadas se desenvuelven en una herramienta desarrollada en Excel nombrada “Selección Tipologías” la cual se encuentra como anexo digital.

5.10. Metodología para la evaluación y selección de tipologías de SUDS

Después de la preselección de las tipologías adecuadas se realiza la evaluación de los criterios de diseño más relevantes, considerando sus beneficios y limitaciones, de acuerdo con el manual CIRIA,

(2007) los criterios de diseño desde los cuales se puede abordar la selección de trenes de SUDS son:

- Mejoramiento de la calidad del agua
- Control de volúmenes de agua lluvia
- Amenidad y conflictos de uso
- Mantenimiento
- Costos de implementación

Por esta razón en este capítulo se presenta un estudio comparativo a nivel cuantitativo y cualitativo de los criterios anteriores para las diferentes tipologías, abordando los valores y rangos encontrados en la literatura, por medio de la metodología propuesta en la Figura 13. Adicionalmente en el numeral 5.10.6 se realiza una descripción adicional de los beneficios y limitaciones por tipología.

5.10.1. Mejoramiento de la calidad del agua

Durante los eventos de tormenta son transportados una gran cantidad de contaminantes, especialmente en áreas urbanizadas, en donde las tasas de concentración son bastante altas debido al gran número de fuentes de contaminación y son transportados dentro del sistema de drenaje hasta el punto de descarga en los cuerpos de agua. Este impacto a los cuerpos de agua receptores puede ser mitigado mediante la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible. Un adecuado diseño, construcción y mantenimiento de estas estructuras puede remover eficientemente una gran cantidad de contaminantes de la escorrentía urbana; la remoción de dichos contaminantes se da a través de mecanismos como la sedimentación, filtración, infiltración, adsorción, degradación, transformación biológica y degradación.

Sedimentos, nutrientes, metales y patógenos hacen parte de los contaminantes más comunes presentes en la escorrentía. En términos de calidad o eficiencias de remoción de contaminantes, las diferentes tipologías presentan un comportamiento variable dependiendo de sus componentes y configuración física. En la Tabla 5 se presenta una clasificación de eficiencia de acuerdo al porcentaje de remoción de los contaminantes, estableciendo un valor cualitativo de Alta, Media y Baja para cada tipología. La calificación de cada una de las tipologías se hace de acuerdo con el informe “Stormwater Best Management Practices: Guidance Document” de la Comisión de Agua y Alcantarillado de Boston, (1999). Esta clasificación varía respecto a la versión presentada en el informe previo debido a nueva información recopilada.

Tabla 5. Criterio de valoración cualitativa.

Eficiencia Promedio % Remoción

Alta >80%

Media 30 - 80%

Baja <30%

Fuente: (Boston Water and Sewer Commission, 2013)

Contaminantes como sedimentos y plomo son fácilmente removidos por mecanismos comunes como asentamiento y filtración; otros contaminantes como el nitrato, fosforo y algunos metales son más difíciles de remover y generalmente requieren de mecanismos químicos y biológicos como bacterias, algas, plantas acuáticas, materia orgánica y/o suelos (Boston Water and Sewer Commission, 2013). Por lo cual a continuación se realiza una descripción de los contaminantes que se encuentran con mayor frecuencia en el agua lluvia de escorrentía y se realiza la calificación de

las tipologías de SUDS respecto a la capacidad de remoción en la Tabla 6.

Sedimentos

Corresponde al material producto del proceso de erosión y transporte de la superficie y que es depositado por el viento, agua y gravedad. Una alta concentración de sedimentos incrementa la turbiedad de la escorrentía, y su depositación en los sistemas de drenaje disminuye la capacidad de transporte y deteriora las estructuras del mismo. Generalmente, estos sedimentos contienen una variedad de contaminantes que son partículas sólidas o que poseen una alta afinidad por la unión a material orgánico. Los sedimentos son principalmente removidos a través de la infiltración y sedimentación. Pueden ser empleados tipologías como Zonas de Bioretención, Cuencas de infiltración y *Grass Buffer* entre otros.

Como se observa en la Tabla 6 las tipologías presentan en su mayoría una alta remoción de sedimentos, exceptuando la cuenca seca de drenaje donde su remoción es inferior al 80% y los tanques de almacenamiento en donde no se remueven contaminantes, ya que estos proveen una eficiencia baja; limitada a la remoción de sólidos suspendidos.

Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo)

Los nutrientes están comúnmente presentes en forma de sales minerales disueltas en agua, una excesiva concentración de nutrientes en los cuerpos de agua puede causar eutrofización y liberación de toxinas. Las principales fuentes de nutrientes en las áreas urbanas corresponden a los fertilizantes, basuras, escombros y suelos erodados. Mediante sedimentación se remueven los nutrientes particulados. En el caso de nutrientes disueltos estos se remueven a través de procesos biológicos como desnitrificación y filtración. Pueden ser empleados tipologías como zonas de bioretención, filtros de arena, humedales artificiales y cunetas verdes.

Dentro de las estructuras con eficiencia de remoción media se encuentran las zonas de bioretención, la cuenca seca de drenaje y los pavimentos porosos. Por otro lado, dentro de las tipologías con alta eficiencia de remoción se encuentran: alcorques inundables, zanjas de infiltración y cunetas verdes. Por su parte los tanques de almacenamiento no presentan remoción de nutrientes, puesto que están diseñados principalmente para almacenar escorrentía y atenuar los picos de descarga máxima.

En general los alcorques inundables se recomiendan para mejorar la calidad del agua, ya que por medio de capas de mantillo, suelo y sistemas de raíces filtran el agua de lluvia reteniendo, degradando y absorbiendo contaminantes como bacterias, nitrógenos, fósforo, metales pesados y grasas

Metales

En este grupo se presentan metales como cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio y zinc, presentes principalmente en pinturas, combustibles y productos automotrices. La principal fuente de

contaminantes en áreas urbanas corresponden a zonas comercializadoras de productos automotrices y productos metálicos, los mecanismos empleados para remover dichos metales del agua de escorrentía incluyen sedimentación, filtración y procesos biológicos y químicos. Generalmente se emplean tipologías como zonas de bioretención, cuencas de infiltración, pavimentos porosos y humedales artificiales.

De acuerdo a la valoración obtenida de la revisión bibliográfica para la remoción de metales de cada una de las tipologías se evidencia que las zanjas de infiltración y las zonas de bioretención presentan una alta eficiencia, las demás tipologías presentan una eficiencia media exceptuando los tanques de

almacenamiento, en donde no se presenta dicho proceso.

Patógenos

Una alta concentración de patógenos dentro del agua puede crear condiciones adversas para los humanos y la vida acuática. La principal fuente de patógenos en áreas urbanas está típicamente asociada al transporte de desechos fecales animales y/o humanos, desbordamiento del alcantarillado sanitario, conexiones ilícitas de líneas de tubería sanitaria a la línea de alcantarillado pluvial, entre otras. Los patógenos son removidos de la escorrentía urbana mediante la reducción del volumen y control de la fuente de contaminación; mecanismos como zonas de bioinfiltración, pavimentos porosos y alcorques indudables pueden reducir la carga contaminante que llega a los cuerpos receptores.

Zonas de bioretención, alcorques inundables, cuencas seca de drenaje y zanjas de infiltración presenta una alta eficiencia de remoción de patógenos; pavimentos porosos presentan una eficiencia media. Por el contrario, si el objetivo es remover patógenos, no se recomienda la implementación de cunetas verdes y/o tanques de almacenamiento, ya que su eficiencia de baja.

Aceites y grasas

La presencia de aceites y grasas en el agua de escorrentía puede afectar la vida acuática como macro y micro invertebrados, sofocar invertebrados y ser tóxicos para los organismos vivientes en las fuentes de agua receptoras. Estos organismos hacen parte de la cadena alimentaria lo cual tiene como consecuencia la afectación de todo un sistema ecológico. Usualmente, este tipo de contaminación puede estar asociada a productos industriales y derivado del petróleo.

Sólo las zonas de bioretención y los alcorques inundables presentan una alta eficiencia de remoción de este contaminante, las demás tipologías, exceptuando tanques de almacenamiento, presentan una eficiencia de remoción media.

Basura y Escombros

El desarrollo de las zonas urbanas puede generar significativas cantidades de basura y escombros si éstos no son manejados adecuadamente. Los cambios en el uso del suelo asociados con el plan de ordenamiento de un área urbana, incluyendo la intensificación de los usos residenciales potencializa la generación de basura y escombros.

De acuerdo a lo observado en la Tabla 6, la mayoría de las tipologías estudiadas presentan una alta eficiencia de remoción de basuras y escombros, exceptuando las cunetas verdes donde se tiene una

eficiencia media y los tanques de almacenamiento en donde su eficiencia depende del pretratamiento que se le dé al agua previo al ingreso a la estructura.

Procesos y configuraciones que dan lugar a diferentes tipos de remoción

Los procesos llevados a cabo por las diferentes estructuras incluyen procesos físicos como la sedimentación, filtración e infiltración, así como algunos procesos térmicos, biológicos y químicos. Una estructura particular puede involucrar uno o varios de estos procesos. El proceso de sedimentación consiste en el proceso de asentamiento de las partículas con mayor densidad en el fluido de interés, este proceso depende ampliamente de factores como la densidad de las partículas, su tamaño y la temperatura de la escorrentía. El proceso de infiltración ocurre cuando el agua fluye

dentro del suelo, una vez el agua se encuentra bajo el suelo, esta fluye de forma lateral como flujo subsuperficial o como parte de la tabla de agua subterránea haciendo que la mayor parte del agua de escorrentía se recolectada y almacenada. Debido a la alta factibilidad de obstrucción o taponamiento de las estructuras con capacidad de infiltración, resulta difícil la obtención de eficiencias de remoción constantes a lo largo de toda su vida útil.

Calificación de las tipologías según la eficiencia de remoción de contaminantes

La clasificación de las tipologías de SUDS de acuerdo con la eficiencia de remoción de los contaminantes más comunes encontrados en el agua lluvia producto del análisis anterior se presenta en la Tabla 6, ésta proporciona una base para la evaluación de las tipologías previamente seleccionadas respecto al criterio de calidad del agua.

Tabla 6. Calificación tipologías según eficiencia de remoción contaminante

Contaminante	1	2	3	4	5
Tipología					
Cunetas verdes	A	M	B	A	M
Tanques de almacenamiento					
Zonas de bioretención	M	A	A	A	A
Alcorques inundables	A	M	A	A	A
Cuenca seca de drenaje	M	M	A	M	M
Zanjas de infiltración	A	A	A	A	M
Pavimentos porosos	M	M	M	A	A

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Baja: 1

Con el panorama que ofrece la tabla anterior se procede a evaluar las tipologías de SUDS, por medio de la matriz que se presenta en la Tabla 7, la cual contiene en las columnas las tipologías seleccionadas para el sitio en estudio y en las filas los contaminantes descritos. La calificación se asigna numéricamente respecto a la eficiencia de remoción donde uno (1) equivale a baja, dos (2) es

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o tecnologías de
 sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que
 más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

media y tres (3) es alta. Al final de la matriz se promedian los resultados y la tipología que presente la calificación más alta, será la tipología más eficiente en la remoción de contaminantes.

Tabla 7. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según eficiencia de remoción de contaminantes

Tipología

Contaminante

Nutrientes

Metales

Patógenos

Sedimentos

Aceites y grasas

Basura y escombros

Total

5.10.2. Control de volúmenes de agua lluvia

En lo que concierne a la regulación de calidad de agua en los cuerpos receptores, el volumen de las descargas se convierte en un parámetro de importancia. Un incremento en la escorrentía de áreas urbanas significa un incremento en la cantidad de contaminantes transportados, así mismo, un aumento en los picos de caudales máximos de escorrentía representa una mayor energía lo cual resulta en un aumento de la energía en los cuerpos receptores y una mayor probabilidad de erosión.

Con el incremento de las superficies impermeables en las cuencas se producen cambios en la hidrología natural de la zona acrecentando la cantidad de agua superficial transportada. Algunas tipologías SUDS proveen reducción del volumen a través de la infiltración y la evapotranspiración, lo cual representa una parte importante en la protección de las cuencas mismas, e incluso una disminución en la contaminación de los cuerpos de agua receptores. La reducción de volumen a la que hace referencia la presente evaluación se refiere a la fracción del agua manejada por determinada tipología que no descarga a los cuerpos de agua receptores (es infiltrada, evaporada, transpirada o reusada). Por otra parte, los procesos de filtración y sorción hacen referencia a los mecanismos por medio de los cuales se promueve la remoción de contaminantes. En este sentido la filtración se entiende como el proceso identificado por el paso de partículas a través de un medio poroso. Por otra la sorción se refiere a los procesos unitarios individuales tanto de absorción y adsorción. Finalmente, la reducción de la descarga máxima hace referencia al desempeño de los sistemas para atenuar el caudal pico del hidrograma, mediante procesos de detención y retención.

Los tanques de almacenamiento se encuentran diseñados para proveer un almacenamiento temporal del agua de escorrentía, por lo cual son recomendables para la reducción de los efectos causados por los picos altos de descarga aguas abajo.

Calificación de las tipologías según el control de volúmenes de agua lluvia

En la Tabla 8 se presenta una comparación cualitativa entre las diferentes tipologías respecto a su eficiencia en la reducción del volumen de escorrentía de acuerdo con lo presentado en “Stormwater

de Agua y Alcantarillado de Boston.

La tipología con rangos más altos de reducción de volúmenes de escorrentía, reducción del pico de descarga y filtración reportados corresponde a las zanjas de infiltración, por otro lado las cunetas verdes y los alcorques inundables presentan los menores rangos de reducción, mientras que las restantes tipologías presentan eficiencias medias de reducción.

Tabla 8. Calificación tipologías según eficiencia de reducción de escorrentía

Criterio de volumen	Tipología	1	2	3
Cunetas verdes		B	B	B
Tanques de almacenamiento		M	M	B
Zonas de bioretención		M	B	A
Alcorques inundables		B	B	M
Cuenca seca de drenaje		B	M	B
Zanjas de infiltración		A	A	A
Pavimentos porosos		A	M	M

A: Alta: 3 M: Media: 2 B: Baja: 1

La matriz que se presenta en la Tabla 9 contiene en las columnas las tipologías seleccionadas para el sitio en estudio y en las filas los criterios descritos, la calificación se da numéricamente respecto a la eficiencia de reducción donde uno (1) equivale a baja, dos (2) es media y tres (3) es alta. Al final de la matriz se promedian los resultados y la tipología que presente la calificación más alta, será la tipología más eficiente en la reducción de volumen de escorrentía.

Tabla 9. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según eficiencia de reducción de escorrentía

Criterio de volumen	Tipología	1	2	3
Reducción volumen				
Reducción descarga máxima				
Filtración y sorción				
Total				

5.10.3. Amenidad y conflictos de uso.

Amenidad

El concepto de amenidad consiste en complementar el componente técnico, que es dado por el análisis de manejo de volumen de escorrentía y mejoramiento de la calidad, con el impacto social

positivo que pueda llegar a tener la implementación de las tecnologías propuestas. La información disponible para evaluar la amenidad se basa en el inventario de zonas verdes y cobertura vegetal actual del sitio seleccionado. Para esto se cuenta con los resultados del estudio sobre la evaluación de los servicios ecosistémicos de las zonas verdes en Bogotá realizado en Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes (Rincón, 2015).

Para incorporar los elementos disponibles en el análisis por amenidad se asume que las zonas verdes y los árboles representan un beneficio social. De igual forma, que la implementación de SUDS puede proveer este servicio además de los beneficios implícitos a nivel de manejo de la escorrentía. A partir de esto se evalúan las tipologías pre-seleccionadas asignando una calificación nula a la tipología que no provee amenidad al sitio, media a la tipología que contribuye a la amenidad del entorno a través de su valor paisajístico y alta a la tipología que favorece en gran medida la amenidad del entorno a través de su valor paisajístico. Lo anterior se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10. Calificación tipologías según contribución a la amenidad

Tipología	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipología 1										
Tipología 2										
Tipología 3										
Tipología 4										
Tipología 5										
Tipología 6										
Tipología 7										
Tipología 8										
Tipología 9										
Tipología 10										

Amenidad **M N A M A N N** A: Alta: 3 M: Media: 2 N: Nula: 0

Conflictos de uso

Se pretende evaluar dos conceptos de como la construcción de las tipologías puedan afectar al uso actual del sitio, los cuales se presentan en la Tabla 11. El primer concepto a evaluar es la posibilidad de que la implementación de las tipologías de SUDS preseleccionadas afecten las actividades actuales en el sitio. Por lo tanto se califica la afectación como alta si la construcción de la tipología imposibilita las actividades para las cuales está concebido el sitio, como media si interfiere en las actividades para las cuales está concebido el sitio y como baja si es acorde o favorece las actividades para las cuales está concebido el sitio.

El segundo concepto consiste en evaluar si las tipologías preseleccionadas pueden representar un riesgo para la seguridad de los usuarios del sitio. En este sentido se califica como alto si representa un riesgo directo para los usuarios del sitio, medio si representa un riesgo menor para los usuarios y bajo si no representa un riesgo.

Tabla 11. Calificación tipologías según conflictos de

Tipología

**Conflicto
de uso**

Actividades en el sitio A B A B M M B Seguridad (para los usuarios) A B M B M M B A: Alto: 1 M: Medio: 2 B:
Bajo: 3

Calificación de las tipologías según amenidad y conflictos de uso

De acuerdo con la evaluación realizada en la Tabla 10 y la Tabla 11 se procede a calificar las tipologías de SUDS previamente seleccionadas, por medio de la matriz que se presenta en la Tabla 12. Ésta contiene en las columnas las tipologías seleccionadas para el sitio en estudio y en las filas los criterios descritos. La calificación se asigna numéricamente respecto a la contribución de la amenidad en donde tres (3) equivale a alta, dos (2) es media y cero (0) es nula, y respecto a los conflictos de uso donde tres (3) equivale a bajo, dos (2) es medio y uno (1) es alto. Al final de la matriz se promedian los resultados y la tipología que presente la calificación más alta, será la tipología con mayor contribución a la amenidad y con menores conflictos de uso.

Tabla 12. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según contribución a la amenidad y conflictos de uso

	Tipología					
Amenidad						
Conflicto de uso						
<u>Amenidad</u>						
Actividades en el sitio						
Seguridad (para los usuarios)						
<u>TOTAL</u>						

5.10.4. Mantenimiento

El mantenimiento es uno de los factores de mayor relevancia en la operación adecuada de los SUDS. Éste define el correcto funcionamiento de la estructura como fue concebida en el diseño o la completa falla de la misma; es necesario considerar la frecuencia del mantenimiento, el equipo requerido y sus responsables para una apropiada ejecución del mismo.

Cunetas verdes

Una parte del mantenimiento de las cunetas verdes, además del mantenimiento periódico que se mencionará a continuación, es la verificación del correcto establecimiento de la vegetación durante los primeros meses de operación. Durante los primeros meses se deben verificar la salud de la vegetación y la estabilidad del suelo, compactación y erosión.

Tabla 13. Actividades de inspección y mantenimiento cunetas verdes

Inspección Frecuencia Actividad de mantenimiento basura Mensual o Según lo requiera M/S			
Acumulación de escombros y			de mantenimiento
R			
Remover la basura y escombros por			parte del personal
Áreas aledañas erodadas	Según lo requiera SR	Reparar con vegetación	
		Reparar erosión en Bancas	
Verificar erosión en bancas	2 a 3 veces por año.		
Presencia de plantas	<u>muerta</u>	eventos de tormenta.	Remover la maleza y
invasoras y/o vegetación	Priorizando en épocas de	<S	reemplazar plantas muertas.
	lluvia y posterior a grandes		

A: Anual S: Semestral M: Mensual SR: Según requerimiento

Tanques de almacenamiento

El mantenimiento en tanques de almacenamiento está enfocado principalmente a la remoción de escombros acumulados en la entrada del tanque.

Tabla 14. Actividades de inspección y mantenimiento tanques de almacenamiento

Inspección Frecuencia Actividad de mantenimiento			
Acumulación de basuras y escombros en cubiertas,			y escombros por parte del personal de mantenimiento
canales, bajantes y entradas. Inspección de bombas (si aplica)			Según especificaciones del fabricante
Mensual o Según lo requiera M/SR			Remover la basura
Profundidad de sedimento,	Una vez al año o Según lo requiera		Vaciar el tanque y limpiar. Remover el
crecimiento de algas, <u>mosquitos u</u>	A/SR		sedimento acumulado
<u>otros insectos</u>			

Fugas en el tanque Reparar o reemplazar según requerimiento. A: Anual S: Semestral M: Mensual SR: Según requerimiento

Zonas de Bioretención

Las actividades de mantenimiento en Zonas de Bioretención están principalmente enfocadas al control de finas partículas de sedimento de las áreas adyacentes para evitar la obstrucción.

Tabla 15. Actividades de inspección y mantenimiento zonas de bioretención

Inspección Frecuencia Actividad de mantenimiento y basuras Mensual o Según lo requiera M/SR			
			Remover la basura y escombros por parte
Acumulación de escombros			del personal de mantenimiento
Zonas de estancamiento de agua después de la lluvia	2 a 3 veces por año. Priorizando en épocas de lluvia y posterior a grandes eventos de tormenta.	Monitorear la taza de infiltración. Si el área no drena en un tiempo inferior a 72 horas, la estructura podría requerir ser reemplazada.	Remover el sedimento acumulado, identificar fuente de sedimento y
Acumulación de sedimento	<S		
Operación de entradas, salidas y estructuras de rebose	Remover sedimento acumulado de las entradas y salidas, y reparar las áreas erosionadas		Una vez al año o según lo requiera. Priorizar en épocas de lluvias y posterior a
Mensual o Según lo requiera M/SR controlar.	Presencia de plantas invasoras y/o vegetación muerta		A Remover la maleza y reemplazar plantas muertas.

Inspección Frecuencia Actividad de mantenimiento

Profundidad del mantillo según especificaciones de <u>diseño</u>	
Limpieza de desagüe de escombros, raíces y sedimento	
Verificación de cambios en la infiltración durante la lluvia y el estancamiento después de esta grandes eventos de tormenta. Adicionar mantillo para conservar la profundidad de diseño	Remover obstrucciones. De ser necesario se debe lavar con agua a presión. Remplazar el área si se presenta estancamiento y pérdida de capacidad de infiltración de manera persistente.

A: Anual S: Semestral M: Mensual SR: Según requerimiento

Alcorques inundables

Los alcorques inundables requieren control de las áreas adyacentes con el objetivo de controlar el sedimento que ingresa a la estructura para prevenir la obstrucción por finas partículas, el personal encargado debe estar debidamente instruido para la ejecución de las actividades de mantenimiento.

Tabla 16. Actividades de inspección y mantenimiento Alcorques inundables

Inspección Frecuencia Actividad de mantenimiento		Acumulación de basura y escombros en rejilla Mensual o Según lo requiera M/SR	
		Remover la basura y escombros por parte del personal de mantenimiento	Monitorear la tasa de infiltración. Si el
Zonas de estancamiento de agua después de la lluvia	después de esta	de lluvias y posterior a grandes eventos de	Remover el sedimento acumulado, identificar fuente de sedimento y controlar.
Áreas adyacentes erosionadas	2 a 3 veces por año. Priorizando en épocas de lluvia y posterior a grandes eventos de tormenta.	<S	Adicionar mantillo para conservar la profundidad de diseño
Acumulación de sedimentos		área no drena en un tiempo inferior a 72 horas, la estructura podría requerir ser remplazada.	Remplazar la estructura si se presenta estancamiento y pérdida de capacidad de infiltración de manera persistente.
Profundidad del mantillo según especificaciones de diseño		Estabilizar suelos descubiertos con césped o grava según sea necesario	
Verificación de cambios en la infiltración durante la lluvia y el estancamiento	Una vez al año o según lo requiera. Priorizar en épocas		
Presencia de plantas invasoras y/o vegetación muerta tormenta. A		Una vez al año	Remover la maleza y reemplazar plantas muertas.

A: Anual S: Semestral M: Mensual SR: Según requerimiento

Cuenca seca de drenaje extendida

Una inspección completa de las cuencas secas de drenaje debe realizarse al menos 1 vez al año para verificar el correcto funcionamiento del sistema. Se debe priorizar la remoción de basuras, escombros y sedimentos posterior a eventos grandes de tormenta.

Tabla 17. Actividades de inspección y mantenimiento cuenca seca de drenaje

Inspección	Frecuencia	Actividad de mantenimiento	basura Mensual o Según lo requiera M/SR	Remove la basura y escombros por parte del personal de mantenimiento
Acumulación de escombros		Operación de salidas	eventos de tormenta.	fuelle de sedimento y controlar.
Acumulación de sedimento	2 a 3 veces por año.	Priorizando en épocas de lluvia y posterior a grandes	<S Remover el sedimento acumulado, identificar	Remover basuras o escombros que
(Chequear obstrucción y/o aumento de velocidades superiores a la de diseño)	causen obstrucción.	Comprobar erosión de las bancas y reparar.	tormenta.	<S Remover la maleza y plantas muertas que estén afectando la operación del sistema.
Semestral S	2 a 3 veces por año.	Presencia de plantas invasoras	lluvia y posterior a grandes eventos de	

A: Anual S: Semestral M: Mensual SR: Según requerimiento

Zanjas de infiltración

Debido a la propensión de las zanjas de infiltración a reducir su eficiencia debido a la obstrucción del medio filtrante, es imperativo un mantenimiento periódico de las mismas a fin de evitar acumulación de sedimento, basura y escombros en el medio filtrante. Con un adecuado diseño y un regular mantenimiento se prolongará la vida útil de las zanjas.

Tabla 18. Actividades de inspección y mantenimiento zanjas de Infiltración

Inspección	Frecuencia	Actividad de mantenimiento	Acumulación de escombros y basura Mensual o Según lo requiera M/SR	Remove la basura y escombros por parte del personal de mantenimiento
Verificación de cambios en la tasa de infiltración durante la lluvia y el estancamiento después de esta lo requiera. Priorizar en épocas de lluvias y posterior a grandes eventos	Una vez al año o según de tormenta.	Remplazar la estructura si se presenta	A	de infiltración de manera persistente. Remover vegetación invasora y raíces
Presencia de plantas invasoras antes de que se establezcan firmemente	2 a 3 veces por año <S	Recortar la hierba de manera		de hierbas, hojas y sedimento de la parte superior de la zanja
Hierba sobre la parte superior de la zanja	requiera M/SR	periódica evitando que su altura supere 4 pulgadas. Eliminar recortes		

A: Anual S: Semestral M: Mensual SR: Según requerimiento

Pavimentos porosos

Los pavimentos permeables o porosos requieren ser aspirados y controlar la acumulación de sedimentos para prevenir la obstrucción de los poros por partículas finas de sedimentos, el personal encargado debe estar debidamente instruido para las actividades de mantenimiento que se enuncian a continuación.

Tabla 19. Actividades de inspección y mantenimiento Pavimentos porosos

	Inspección	Frecuencia	Actividad de mantenimiento
Acumulación de escombros y basuras	lo requiera	M/SR	pavimento mediante escobas y recogedores
Mensual o Según	Remoción de basura y escombros del		
Zonas de estancamiento de agua	Mínimo 3 veces al		año. Priorizando en Aspirar el área comprometida para reducir el riesgo de obstrucción
Acumulación de sedimento en el pavimento	a grandes		acumulado. Identificar fuente de sedimento y reparar
épocas de lluvia y posterior	>M Remover el sedimento		
	Operación de las salidas	Remover el sedimento acumulado en las eventos de tormenta salidas y reparar las zonas	erosionadas
Presencia de vegetación	Remover la vegetación presente	Prueba de infiltración	Una vez al año A Comprobar la tasa de infiltración. Rehabilitar acorde a los resultados.

A: Anual S: Semestral M: Mensual SR: Según requerimiento

Calificación de las tipologías según el control de volúmenes de agua lluvia

En la Tabla 20 se presenta una comparación entre las diferentes tipologías respecto al número de actividades y la frecuencia (mensual, semestral y anual) con la que se debe realizar las actividades de mantenimiento, calificando con frecuencia baja si el mantenimiento se debe realizar anual, media si se debe realizar mantenimiento semestral y alta si el mantenimiento es mensual, adicional se muestra el número de actividades de mantenimiento que se deben realizar en cada tipología.

Las tipologías con mayor frecuencia y/o mayor número de actividades de monitoreo son las zona de bioretención, las zanjas de infiltración y los pavimentos porosos, mientras que las cunetas verdes y los tanques de almacenamiento requieren un bajo mantenimiento.

Tabla 20. Calificación tipologías según frecuencia de mantenimiento

Tipología	Frecuencia de mantenimiento	Actividades	Calificación
Anual	IIII	Semestral	IIII
Mensual	IIII		IIII
TOTAL	BAJA	BAJA	ALTA MEDIA MEDIA

ALTA ALTA A: Alta: 1 M: Media: 2 B: Baja: 3

Con el panorama que ofrece la tabla anterior se procede a calificar las tipologías de SUDS previamente seleccionadas, por medio de la matriz que se presenta en la Tabla 21, que contiene en las columnas las tipologías seleccionadas para el sitio en estudio y en las filas los criterios descritos. La calificación se da numéricamente respecto a la frecuencia y al número de actividades de mantenimiento, donde tres (3) equivale a baja, dos (2) es media y uno (1) es alta. Al final de la

matriz se promedian los resultados y la tipología que presente la calificación más alta, será la tipología con menor mantenimiento.

Tabla 21. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según frecuencia de mantenimiento

	Semestral	Mensual	TOTAL
Costos			
Anual	5.10.5.		

Los SUDS representan costos significativos para las comunidades donde se desean implementar, estos costos deben ser contrastados frente a los diferentes beneficios que proveen como por ejemplo: menores costos en el sistema de colectores, control de contaminación, recarga de acuíferos, integridad paisajística, entre otras. La escorrentía urbana transporta nutrientes, metales, aceites y grasas que son conducidas por un sistema de colectores hasta los cuerpos receptores; factores como la intensidad y duración de los eventos de precipitación, el tipo de estructura, las actividades de mantenimiento y las condiciones particulares del sitio definen la forma como se eliminan estos contaminantes o se atenúan los caudales máximos de descarga. Dado que estos mismos factores varían dependiendo del lugar de implementación, se recomienda, con la información disponible, realizar un estimativo de los costos que acarrea cada tipología para el sitio.

Debido a la limitada información disponible relacionada a los costos de construcción y mantenimiento de las estructuras SUDS. A continuación se expresan los costos de construcción y mantenimiento de manera cualitativa como se encuentra consignado en Louisiana Public Health Institute, Geosyntec Consultants, (2010). Los costos varían de acuerdo a las condiciones locales como son los accesos de los sitios, topografía, área, técnicas constructivas, costos de material, obras adicionales requeridas, entre otras. En general, las condiciones particulares de cada sitio tienden a incrementar o disminuir los costos de cada tipología.

Cunetas Verdes

Fletcher, Duncan, Poelsma, & Lloyd, (2004) estimaron un costo de capital para cunetas verdes de aproximadamente AU\$4.50 /m², este costo incluye las actividades de movimiento de tierra, mano de obra y el establecimiento de la cobertura vegetal. Los costos de mantenimiento anual fueron valorados en AU\$2.50/m².

Según se encuentra consignado en URS, (2003), el costos de construcción de una cuneta verde de 1m de largo y 3m de ancho en Sídney se estima en aproximadamente AU\$30.0 /m, en el cual se incluye las actividades de movimiento de tierra, suministro e instalación de la capa de suelo para la siembra, y el suministro y siembra de la cobertura vegetal, fertilizante y riego.

Los costos de mantenimiento de acuerdo con Beecham, (2002) (citado en URS, 2003) se estimaron en AU\$2.50 /m² de cuneta por año. En Taylor & Wong, (2002) se referencia un costo de mantenimiento anual entre el 5% - 7% del costo total de construcción.

Louisiana Public Health Institute, Geosyntec Consultants, (2010) determinaron los costos cualitativos de diferentes tipologías como se muestra a continuación en la Tabla 22.

Tabla 22. Costos cualitativos cunetas verdes

Cunetas verdes
Costos de Capital BAJO
Costos de Mantenimiento Menor MEDIO
Frecuencia de Mantenimiento Menor MEDIO
Costos de Mantenimiento Mayor BAJO
Frecuencia de Mantenimiento Mayor BAJO

Las actividades de mantenimiento menor son tales como:

- Mantenimiento de la vegetación para preservación de la estética.
- Remoción de basuras, escombros, aceites o grasas de la superficie.
- Remoción menor de la acumulación de sedimento cerca de las estructuras de salida. - Estabilización de áreas erodadas.
- Eliminación de vectores y condiciones que favorezcan su proliferación

Las actividades de mantenimiento mayor son tales como:

- Reparación de las pendientes laterales si se requiere.
- Restablecimiento de la pendiente de diseño.
- Airear áreas compactadas para restaurar la capacidad de infiltración.

Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento se encuentran disponibles en una variedad numerosa de tamaños y materiales, su costo varía entre uno y otro, y depende de las particularidades del sitio. Pueden ser instalados bajo tierra o sobre ésta. Las actividades de mantenimiento son mínimas y generalmente involucran limpieza o sustitución de los filtros y actividades de mantenimiento propias del sistema de bombeo según lo especifique el fabricante.

De acuerdo con Fletcher, Duncan, Poelsma, & Lloyd, (2004), los costos de suministro e instalación de un tanque de 4,500 L sobre la superficie es de AU\$500 y para el mismo tanque enterrado el costo se incrementa a AU\$2,500. Los costos de mantenimiento fueron estimados en AU\$70 por año.

En URS, (2003) se presentan las tablas de costos típicos mostradas a continuación

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Investigación de las Tipologías y/o tecnologías de
 sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que
 más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.

Tabla 23. Costos típicos de tanques de almacenamiento

Tipo de Tanque	Costo	
	4.5kL	9kL
Hierro Galvanizado	AU\$440	AU\$640
Polímero	AU\$670	AU\$1150
Concreto	AU\$1300	AU\$1800

(URS, 2003)

Tabla 24. Costos de Instalación y accesorios Tanques de Almacenamiento

ítem	Costo
Sistema de bombeo y control de presión	AU\$350
Base para el tanque	AU\$300
Instalación	AU\$450
Accesorios	AU\$500
Total	AU\$1600

(URS, 2003)

Louisiana Public Health Institute, Geosyntec Consultants, (2010) determinaron los costos cualitativos de diferentes tipologías como se muestra a continuación en la Tabla 25.

Tabla 25. Costos cualitativos tanques de almacenamiento

Tanques de almacenamiento	
Costos de Capital	MEDIO
Costos de Mantenimiento Menor	BAJO
Frecuencia de Mantenimiento Menor	BAJO
Costos de Mantenimiento Mayor	ALTO
Frecuencia de Mantenimiento Mayor	MEDIO

Fuente: Luisiana 2010

Las actividades de mantenimiento menor son tales como:

- Inspección de fugas en tanques, tuberías y válvulas del sistema.
- Limpieza de canales y bajantes.
- Reparaciones menores de las estructuras de entrada y salida si lo requiere.

Las actividades de mantenimiento mayor son tales como:

- Reemplazo de pantallas rotas, llaves, válvula etc.
- Reparaciones estructurales del tanque.
- Revisiones eléctricas y de la bomba según requerimiento.

Zonas de Bioretención

El informe elaborado por Fletcher, Duncan, Poelsma, & Lloyd, (2004) proporciona un costo total de construcción para zonas de bioretención igual a AU\$135 por metro lineal, basado en información obtenida de Lynbrook Estate Water Sensitive Urban Desing.

Los costos de construcción asociados a las zonas de bioretención dependen del área de la superficie, profundidad y tipo de vegetación empleada, además de las estructuras de entrada y salida requeridas. De acuerdo con URS, (2003), para una zona de 3m de ancho y 1m de profundidad nominal el costo total es de AU\$410/m de longitud. Este valor incluye las actividades de excavación manual, suministro e instalación del geotextil, tubería de drenaje subterránea, capa de grava/área filtrante, capa superficial de suelo y el suministro e instalación de la capa vegetal, incluyendo fertilizante y riego. Los costos de mantenimiento se consideran similares a los requeridos por los sistemas de cunetas verdes, el costo estimado de mantenimiento varía entre AU\$1.5/m² A AU\$2.5/m² de área.

Los costos de mantenimiento anual de acuerdo con información obtenida en casos de estudios aplicados en Estados Unidos y presentados por Taylor & Wong, (2002) se estimaron entre el 5% y 7% del costo total de construcción. Louisiana Public Health Institute, Geosyntec Consultants, (2010) determinaron los costos cualitativos de diferentes tipologías como se muestra a continuación en la Tabla 26.

Tabla 26. Costos cualitativos zonas de bioretención

Zonas de bioretención
Costos de Capital MEDIO
Costos de Mantenimiento Menor MEDIO
Frecuencia de Mantenimiento Menor BAJO
Costos de Mantenimiento Mayor ALTO
Frecuencia de mantenimiento Mayor BAJO
Fuente: Luisiana 2010

Las actividades de mantenimiento menor son tales como:

- Mantenimiento de la vegetación para preservación de la estética
- Remoción de basuras, escombros, aceites o grasas de la superficie.
- Remoción menor de la acumulación de sedimento cerca de las estructuras de salida. - Estabilización de áreas erodadas.
- Eliminación de vectores y condiciones que favorezcan su proliferación

Las actividades de mantenimiento mayor son tales como:

- Restablecimiento de la pendiente de diseño.
- Airear áreas compactadas para restaurar la capacidad de infiltración.

Alcorques Inundables

De acuerdo con The State University of New Jersey, (2013) un caso de estudio en New Jersey determinó un costo de USD\$12,500 por cada Alcorque, cada uno de los cuales trataba un área de drenaje igual a 0.13Ha. Adicionalmente se presenta un costo de mantenimiento en un rango de USD\$100 – USD\$500 anual/alcorque según Charles River Watershed Association (2008).

UNHSC, (2012) dedicado a la protección del recurso hídrico a través del manejo efectivo de las aguas lluvias mediante la evaluación y refinamiento del desempeño de sistemas de tratamiento de