UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTADO DEINGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2013

RETENCIÓN DE AGUAS LLUVIAS A NIVEL PREDIAL PARA REDUCIR PICOS Y VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA

PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL

Juan Sebastián Lovado Cediel
Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a:

Mi familia Alberto, Leda y Andrés, por su extraordinario apoyo y solidaridad, no solo en mi proceso educativo, sino a lo largo de mi vida. Gracias por tanto.

Mi novia, Ana María, por acompañarme en este momento de mi vida y por su ayuda incondicional.

Mi asesor, el Ingeniero Juan G. Saldarriaga, por su gran labor como guía y ejemplo a lo largo de este proyecto de grado. He aprendido mucho de usted.

Inés Elvira Wills, Frans Alferink y Francisco Mendoza por compartir conmigo su vasto conocimiento y su interés en este proyecto de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS ..... **I**

TABLA DE CONTENIDO ..... **II**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **IV**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **VII**

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS **1**

1.1. INTRODUCCIÓN 1
1.2. OBJETIVOS 3
1.2.1. Objetivos generales *3*
1.2.2. Objetivos específicos *3*

2. CONTEXTUALIZACIÓN Y MARCO TEÓRICO **4**

2.1. CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN VS. INFRAESTRUCTURA DE DRENAJE 4
2.2. AUMENTO DE VOLÚMENES DE LLUVIA: URBANIZACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO 8
2.2.1. Urbanización *8*
2.2.2. Cambio Climático *15*
2.3. AUMENTO DE LAS INUNDACIONES 17
2.3.1. Caso Argentina *18*
2.3.2. Caso México *19*
2.3.3. Caso Colombia *20*
2.4. FILOSOFÍA TRADICIONAL DE DRENAJE VS NUEVAS VISIONES 25
2.4.1. Filosofía tradicional de drenaje urbano *25*
2.4.2. Visión alternativa de drenaje urbano *27*
2.4.3. Prácticas de manejo en la fuente (SMPs) *30*

3. SISTEMAS DE RETENCIÓN DE AGUA LLUVIA A NIVEL PREDIAL **37**

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL 37
3.2. COMPONENTES 39
3.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO 41
3.3.1. Condiciones del sitio *41*
3.3.2. Usos del agua lluvia *43*
3.3.3. Objetivos de diseño y configuraciones *43*
3.4. CRITERIOS DE DISEÑO 47
3.4.1. Área de captación *47*
3.4.2. Sistema de recolección y transporte *49*
3.4.3. Sistema de almacenamiento *56*
3.4.4. Sistema de entrega o distribución *59*

4. ALMACENAMIENTO PASIVO (BARRILES DE LLUVIA) **60**

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL 60
4.1.1. Características, tipos y componentes *60*
4.1.2. Ventajas *63*
4.1.3. Desventajas *64*
4.2. DESEMPEÑO Y EFICIENCIA 65
4.2.1. Desempeño en cuanto a la cantidad *65*

4.2.2. Desempeño en cuanto a la calidad ... 70

5. ALMACENAMIENTO ACTIVO (TANQUES Y CISTERNAS) ... 73

5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL ... 73
5.1.1. Características, tipos y componentes ... 73
5.1.2. Ventajas ... 78
5.1.3. Desventajas ... 78
5.2. DESEMPEÑO Y EFICIENCIA ... 79
5.2.1. Desempeño en cuanto a la cantidad ... 79
5.2.2. Desempeño en cuanto a la calidad ... 86

6. NUEVAS TECNOLOGÍAS RETENCIÓN/INFILTRACIÓN (AQUACELL) ... 91

6.1. DESCRIPCIÓN GENERAL ... 91
6.1.1. Características, tipos y componentes ... 91
6.1.2. Ventajas ... 98
6.1.3. Desventajas ... 99
6.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO ... 100
6.3. DESEMPEÑO Y EFICIENCIA ... 105

7. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ... 107

7.1. ALMACENAMIENTO PASIVO ... 107
7.2. ALMACENAMIENTO ACTIVO ... 108
7.3. NUEVAS TECNOLOGÍAS RETENCIÓN/INFILTRACIÓN (AQUACELL) ... 110

8. CASOS Y EXPERIENCIAS REALES DE APLICACIÓN ... 111

8.1. ALMACENAMIENTO PASIVO ... 111
8.2. ALMACENAMIENTO ACTIVO ... 113
8.3. NUEVAS TECNOLOGÍAS RETENCIÓN/INFILTRACIÓN (AQUACELL) ... 116

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ... 120

9.1. CONCLUSIONES ... 120
9.2. RECOMENDACIONES ... 123

10. REFERENCIAS ... 124

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1. EFECTO DE LA URBANIZACIÓN SOBRE EL DESTINO DEL AGUA LLUVIA (FUENTE: [11]) 9
FIGURA 2-2. EFECTO DE LA URBANIZACIÓN EN LA TASA DE ESCORRENTÍA GENERADA (FUENTE: [11]) 10
FIGURA 2-3. ESCORRENTÍA MENSUAL MEDIDA PARA EL PERIODO DE ESTUDIO CON RESPECTO A LOS TRES ESCENARIOS DE URBANIZACIÓN (FUENTE: [14]) 11
FIGURA 2-4. A) RELACIÓN ENTRE LA ESCORRENTÍA GENERADA Y EL GRADO DE URBANIZACIÓN DEPENDIENDO DE LA PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LA LLUVIA (FUENTE: [13]), B) EFECTO DEL PORCENTAJE DE ÁREA IMPERMEABLE EN LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA (FUENTE: [14]) 11
FIGURA 2-5. PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN MENSUALES PARA CONDICIONES DE PRE-DESARROLLO Y LOS TRES ESCENARIOS DE URBANIZACIÓN (FUENTE: [12]) 12
FIGURA 2-6. ANÁLISIS CUALITATIVO DEL BALANCE ENERGÉTICO SUPERFICIAL BAJO 2 ESCENARIOS: URBANIZADO Y NO URBANIZADO (FUENTE: [9]) 13
FIGURA 2-7. EXPLICACIÓN DEL AUMENTO DE LA PRECIPITACIÓN GLOBAL A CONSECUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO (ADAPTADA DE [25]) 16
FIGURA 2-8. A) COMPARACIÓN DE LOS VOLÚMENES TOTALES DE LOS SISTEMAS COMBINADOS DE DRENAJE PARA LA CIUDAD DE HELSINGBORG, SUECIA (2001-2002) PARA UN ESCENARIO COMBINADO FUTURO (CAMBIO CLIMÁTICO + URBANIZACIÓN) (FUENTE: [27]), B) COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS DE DRENAJE DE LONDRES CON RESPECTO A LA LLUVIA DE 1980 Y UN ESCENARIO CLIMÁTICO FUTURO (FUENTE: [26]) 17
FIGURA 2-9. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE DESASTRES POR INUNDACIONES REPORTADAS EN EL MUNDO Y SU DISTRIBUCIÓN DESDE 1970 HASTA 2011 (ADAPTADA DE [29]) 18
FIGURA 2-10. EVOLUCIÓN DE LOS EVENTOS REPORTADOS DE INUNDACIÓN Y PERSONAS AFECTADAS EN COLOMBIA A PARTIR DE 1970 (FUENTE [35]; DESINVENTAR.ORG) 21
FIGURA 2-11. ESQUEMA DEL DRENAJE DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA 2013 (FUENTE: GOOGLE MAPS Y PROYECTO ARROYOS DE BARRANQUILLA (HTTP://WWW.ARROYOSDEBARRANQUILLA.CO)) 23
FIGURA 2-12. A) SISTEMA CONVENCIONAL COMBINADO DE DRENAJE URBANO (FUENTE: [42]), B) SISTEMA CONVENCIONAL SEPARADO DE DRENAJE URBANO (FUENTE: [42]) 26
FIGURA 2-13. A) SISTEMA ALTERNATIVO DE DRENAJE URBANO – MANEJO EN LA FUENTE (FUENTE: [42]), B) SISTEMA ALTERNATIVO DE DRENAJE URBANO - MANEJO EN LA FUENTE, COMBINADO CON SISTEMA CENTRALIZADO DE ALMACENAMIENTO (FUENTE: [45]) 29
FIGURA 2-14. EJEMPLOS DE DISTINTOS TIPOS DE SMPS. A) ESTANQUE DE RETENCIÓN (*RETENTION POND*), B) CUNETA VERDE (*VEGETATED SWALE*), C) SUPERFICIE PERMEABLE (*POROUS/PERMEABLE PAVING*) Y D) CUBIERTA VERDE (*GREEN ROOF*) ... 34
FIGURA 3-1. ESQUEMA TÍPICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO/DETENCIÓN CON CADA UNO DE LOS COMPONENTES BÁSICOS (ADAPTADA DE [53] 40
FIGURA 3-2. CONFIGURACIÓN SISTEMA 1: CONSUMO COMPLETO INTERNO CON CONSUMO EXTERNO OPCIONAL (FUENTE: [56]) 44
FIGURA 3-3. A) CONFIGURACIÓN SISTEMA 2: CONSUMO PARCIAL EXTERNO CON REDUCCIÓN Y CONTROL COMPLETO DE LA ESCORRENTÍA (FUENTE: [56]), B) CONFIGURACIÓN SISTEMA 3: CONSUMO COMPLETO INTERNO, CONSUMO PARCIAL EXTERNO CON REDUCCIÓN Y CONTROL PARCIAL DE LA ESCORRENTÍA (FUENTE: [56]) 45
FIGURA 3-4. A) ESQUEMA CONFIGURACIÓN TANQUE 1 (FUENTE: [58]), B) ESQUEMA CONFIGURACIÓN TANQUE 2: (FUENTE: [58]) 46
FIGURA 3-5. ESQUEMA CONFIGURACIÓN TANQUE 3 (FUENTE: [56]) 47
FIGURA 3-6. ESQUEMA GENERAL DE UN ÁREA DE CAPTACIÓN TÍPICA (TECHO) CON SU ÁREA CONTRIBUYENTE RESPECTIVA. (ADAPTADA DE: [54]) 48
FIGURA 3-7. A) EJEMPLO TÍPICO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE, B) ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE CONFORMADO POR CANALETAS Y BAJANTES. 50

FIGURA 3-8. A) ESQUEMA DE UNA PANTALLA/FILTRO UBICADA ANTES DE UN ELEMENTO DE ALMACENAMIENTO (FUENTE: [54]), B) EJEMPLO TÍPICO DE UNA PANTALLA/FILTRO DE HOJAS Y DESECHOS UBICADA EN UNA CANALETA Y C) EJEMPLO TÍPICO DE UNA PANTALLA/FILTRO DE DESECHOS Y VECTORES UBICADA EN EL INTERIOR DE UN TANQUE DE RETENCIÓN. 51
FIGURA 3-9. A) ESQUEMA GENERAL DE LA UBICACIÓN Y COMPONENTES DE UN DESVIADOR DE PRIMER LAVADO (ADAPTADA DE: [62]), B) EJEMPLO TÍPICO DE UN DESVIADOR DE PRIMER LAVADO (FUENTE: [63]). 52
FIGURA 3-10. A) DESVIADOR DE PRIMER LAVADO DE TUBO VERTICAL (FUENTE: [53]), B) DESVIADOR DE PRIMER LAVADO DE TUBO VERTICAL CON VÁLVULA DE BOLA (FUENTE: [53]), C) ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UN DESVIADOR DE PRIMER LAVADO DE TUBO VERTICAL CON VÁLVULA DE BOLA (ADAPTADA DE: [54]). 53
FIGURA 3-11. A) ESQUEMA TÍPICO DE UN TANQUE SEDIMENTADOR COLOCADO ANTES DEL ELEMENTO DE ALMACENAMIENTO (FUENTE: [54]), B) ESQUEMA TÍPICO DE OTRO TIPO DE TANQUE SEDIMENTADOR EMPLEADO (ROOF WASHER) QUE ADEMÁS POSEE FILTRO (FUENTE: [53]) 55
FIGURA 3-12. A) INSTALACIÓN TÍPICA DE UN FILTRO/SEDIMENTADOR DE VÓRTICE (FUENTE: [56]), B) INTERIOR DE UN FILTRO/SEDIMENTADOR DE VÓRTICE (FUENTE: [56]). 55
FIGURA 3-13. ESQUEMA DE VOLÚMENES INCREMENTALES DE DISEÑO ASOCIADOS AL DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE ALMACENAMIENTO (FUENTE: [58]) 57
FIGURA 3-14. DISTINTAS CONFIGURACIONES DEL MECANISMO DE DESBORDAMIENTO: A) CONFIGURACIÓN ESTÁNDAR, B) EXCLUSIÓN DE ENTRADA, C) SALIDA DE FONDO Y D) ACCIÓN TIPO SIFÓN CON LIMPIEZA SUPERFICIAL (FUENTE: [54]) 59
FIGURA 4-1. DIFERENTES TIPOS Y CONFIGURACIONES DE SISTEMAS PASIVOS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA LLUVIA: A) CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UN BARRIL CILÍNDRICO DE AGUA LLUVIA, B) CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA DE BARRILES DE AGUA LLUVIA PUESTOS EN SERIE Y C) CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UN BARRIL NO CILÍNDRICO DE AGUA LLUVIA. 61
FIGURA 4-2. ESQUEMA TÍPICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO PASIVO DE AGUA LLUVIA (BARRIL) CON SUS COMPONENTES. (ADAPTADA DE: [70, 71, 72]) 63
FIGURA 4-3. RESULTADOS DEL ESTUDIO [74] A) COMPARACIÓN ESCENARIOS PARA UN EVENTO DE LLUVIA SUAVE B) COMPARACIÓN DE ESCENARIOS PARA UN EVENTO DE LLUVIA FUERTE. (FUENTE: [74]) 66
FIGURA 4-4. RESULTADOS DE ATENUACIÓN DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA ESTUDIO [75] A) PROMEDIO DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA BAJO LOS 6 ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA CUENCA URBANA 1, B) PROMEDIO DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA BAJO LOS 6 ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA CUENCA URBANA 2 (FUENTE: [75]) 68
FIGURA 4-5. RESULTADOS ESTUDIO [76]. REDUCCIONES DEL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE AGUA LLUVIA PARA DISTINTAS CIUDADES DE ESTADOS UNIDOS (ADAPTADA DE: [76]). 69
FIGURA 4-6. RESULTADOS DE CALIDAD DEL AGUA ESTUDIO [75] A) PROMEDIO DE CARGAS ANUALES POR HECTÁREA DE TP Y TN BAJO LOS 6 ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA CUENCA URBANA 1, B) PROMEDIO DE CARGAS ANUALES POR HECTÁREA DE TP Y TN BAJO LOS 6 ESCENARIOS PROPUESTOS PARA LA CUENCA URBANA 2 (FUENTE: [75]) 71
FIGURA 5-1. DIFERENTES TIPOS Y CONFIGURACIONES DE SISTEMAS ACTIVOS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA LLUVIA: A) SERIE DE TANQUES SUB SUPERFICIALES HECHOS EN FIBRA DE VIDRIO (FUENTE: [56]), B) DOS TANQUES SUBSUPERFICIALES DE PLÁSTICO COLOCADOS EN PARALELO (FUENTE: [56]), C) TANQUE SUPERFICIAL CONSTRUIDO EN ACERO GALVANIZADO DE MENOR CAPACIDAD (FUENTE: [53]) Y D) TAQUE SUPERFICIAL CONSTRUIDO EN MADERA DE GRAN CAPACIDAD Y DE USO RURAL (FUENTE: [53]). 76
FIGURA 5-2. ESQUEMA TÍPICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ACTIVO DE AGUA LLUVIA (CISTERNA O TANQUE) CON SUS COMPONENTES BÁSICOS (ADAPTADA DE: [56]) 77
FIGURA 5-3. A) ESQUEMA CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA ACTIVO DE ALMACENAMIENTO (ADAPTADA DE: [78]), B) MODELO CONCEPTUAL DE RETENCIÓN SIMPLE (ADAPTADA DE: [78]) 80
FIGURA 5-4. RESULTADOS ESTUDIO [78]. EFECTO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO EN LLUVIAS FUERTES. (FUENTE: [78]) .. 81
FIGURA 5-5. RESULTADOS DEL ESTUDIO [74]. EFECTO DE LA INSTALACIÓN DE TANQUES MÁS GRANDES SOBRE LA REDUCCIÓN DE PICOS DE CAUDAL PARA EVENTOS FUERTES DE LLUVIA. (FUENTE: [74]) 82
FIGURA 5-6. RESULTADOS ESTUDIO [76]. REDUCCIONES DEL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE AGUA LLUVIA PARA DISTINTAS CIUDADES DE ESTADOS UNIDOS (ADAPTADA DE: [76]). 84

FIGURA 5-7. RESULTADOS ESTUDIO [79]. A) EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS ACTIVOS DE ALMACENAMIENTO CON RESPECTO A DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO (FUENTE: [79]) Y B) DURACIÓN DE LOS DESBORDAMIENTOS EN LOS SISTEMAS ACTIVOS DE ALMACENAMIENTO CON RESPECTO VARIOS PERIODOS DE RETORNO (FUENTE: [79]) 85
FIGURA 5-8. RESULTADOS ESTUDIO [80]. A) RESULTADOS ESCENARIO 2: SENSIBILIDAD AL TAMAÑO DEL TANQUE (FUENTE: [80]), B) RESULTADOS ESCENARIO 3: SENSIBILIDAD A VARIACIONES EN EL ÁREA DE CAPTACIÓN (FUENTE: [80]) 88
FIGURA 5-9. RESULTADOS ESTUDIO [79]. A) EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS ACTIVOS DE ALMACENAMIENTO EN CUANTO A LA CONCENTRACIÓN DE TSS PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO (FUENTE: [79]) 89
FIGURA 6-1. DIFERENTES TIPOS Y CONFIGURACIONES DE SISTEMAS MODULARES DE ALMACENAMIENTO/INFILTRACIÓN DE AGUA LLUVIA: A) SISTEMA TÍPICO DE AQUACELL-WAVIN (FUENTE: [86]), B) SISTEMA TÍPICO DE CHAMBER MAXX-CONTECH ... 92
FIGURA 6-2. ESQUEMA TÍPICO DE UN SISTEMA MODULAR DE ALMACENAMIENTO/INFILTRACIÓN DE AGUA LLUVIA (AQUACELL-WAVIN) CON SUS COMPONENTES BÁSICOS (FUENTE: [44, 86]) 93
FIGURA 6-3. DOS TIPOS DE SEPARADORES DE SEDIMENTOS. A-1) SEPARADOR PEQUEÑO DE SEDIMENTOS (SILT TRAP 6LB600 WAVIN) (FUENTE: [84]), A-2) FUNCIONAMIENTO DEL SEPARADOR PEQUEÑO DE SEDIMENTOS (ADAPTADA DE: [44]) Y B) SEPARADOR HIDRODINÁMICO COMBINADO DE SEDIMENTOS (WAVIN) (FUENTE: [44]) 95
FIGURA 6-4. SEPARADORES DE HOJAS/SEDIMENTOS TIPO "GULLY". A) GULLY CONVENCIONAL PUESTO EN CAMPO (FUENTE: [88]), B) VISTA EXTERIOR E INTERIOR DEL COLECTOR Y DOS TIPOS DE CUBRIMIENTOS DE UN SEPARADOR DE HOJAS/SEDIMENTOS TIPO "GULLY" (FUENTE: [88]) 96
FIGURA 6-5. A) UNIDAD BÁSICA DEL SISTEMA AQUACELL (WAVIN) CON SUS DIMENSIONES (FUENTE: [85]), B) EJEMPLO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA MODULAR AQUACELL (WAVIN) (FUENTE: [86]), C) COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA ENSAMBLADO POR UNIDADES AQUACELL (WAVIN) (FUENTE: [85]) 97
FIGURA 6-6. DISTINTOS ELEMENTOS QUE COMPONEN EL SISTEMA DE ENTREGA EN UN SISTEMA MODULAR DE ALMACENAMIENTO/INFILTRACIÓN. A) CÁMARA DE INSPECCIÓN TRADICIONAL CONSTRUIDA EN CONCRETO Y CON UN MECANISMO DE CONTROL (FUENTE: [85]), B) CÁMARA DE INSPECCIÓN NOVACAM-1000 (WAVIN) (FUENTE: [89]). 98
FIGURA 6-7. A) SISTEMA TRADICIONAL DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE VS B) SISTEMA DE FLUJO RÁPIDO (QUICKSTREAM SYSTEM) (FUENTE: [90]) 101
FIGURA 6-8. ESQUEMA BÁSICO DE DISEÑO/UBICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE QUIEBRE Y SEPARACIÓN EN UN SISTEMA MODULAR DE RETENCIÓN/INFILTRACIÓN (ADAPTADA DE: [91]) 102
FIGURA 6-9. TREN DE SELECCIÓN DEL TIPO DE UNIDAD MODULAR A EMPLEAR DEPENDIENDO DE LAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL SITIO (FUENTE: [84]) 103
FIGURA 6-10. ESQUEMA TÍPICO DE UNA CONFIGURACIÓN DE COLECTOR "ON-LINE" DESARROLLADA POR WAVIN OVERSEAS (FUENTE: [85]) 104
FIGURA 8-1. A) SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ACTIVO DEL LADY BIRD JOHNSON WILDFLOWER CENTER – AUSTIN, TEXAS (FUENTE: [53]), B) SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ACTIVO DEL CLAUDE MOORE EDUCATIONAL COMPLEX – ROANOKE, VIRGINIA (FUENTE: [95]) Y C) 115
FIGURA 8-2. A) SISTEMA MODULAR DE ALMACENAMIENTO/RETENCIÓN DE AGUA LLUVIA - ESTADIO DE FRANKFURT (FUENTE: [86]), B) SISTEMA MODULAR DE ALMACENAMIENTO/RETENCIÓN DE AGUA LLUVIA - ESTADIO OLÍMPICO DE BERLÍN (FUENTE: [86]) 117
FIGURA 8-3. ESQUEMA GENERAL DE DISEÑO EN PERFIL SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MODULAR DE ALMACENAMIENTO EN UNA BODEGA DE LA COMPAÑÍA PAVCO – MEXICHEM DE COLOMBIA (FUENTE: [91]). 118
FIGURA 8-4. A) INSTALACIÓN DEL SISTEMA AQUACELL EN EL EDIFICIO RESIDENCIAL ARBOREDA - CHÍA, CUNDINAMARCA Y B) PROYECTO CULMINADO. (FUENTE: [87]) 119

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1. AMÉRICA LATINA: POBLACIÓN TOTAL SEGÚN CENSOS (1950-2010) (EN MILES) (ADAPTADA DE: [1, 2]) 4
TABLA 2-2. TASA MEDIA ANUAL DE CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN TOTAL DE ALGUNOS PAÍSES LATINOAMERICANOS (1950-2010) (POR 100 HABITANTES) (ADAPTADA DE: [1, 2]) 4
TABLA 2-3. PORCENTAJE DE LA POBLACIÓN URBANA DE ALGUNOS PAÍSES DE AMÉRICA LATINA (1950-2010) (ADAPTADA DE: [1, 2]) 5
TABLA 2-4. TASA ANUAL DE CRECIMIENTO POBLACIONAL URBANO Y TASA MEDIA DE URBANIZACIÓN (1950-2010) (ADAPTADA DE: [1, 2]) 5
TABLA 2-5. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO EN COLOMBIA: COMPARACIÓN CON EL CRECIMIENTO POBLACIONAL (ADAPTADA DE: [5, 6, 7] 6
TABLA 2-6. PRINCIPALES VENTAJAS, DESVENTAJAS, SIMILITUDES Y DIFERENCIAS ENTRE LOS SISTEMAS CONVENCIONALES Y LOS SISTEMAS ALTERNATIVOS DE DRENAJE URBANO (ADAPTADA DE: [41]) 30
TABLA 2-7. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS TECNOLOGÍAS SMP EN CUANTO A CONTROL DE CAUDAL PICO, REDUCCIÓN DE VOLÚMENES, CONTROL DE CONTAMINANTES Y CONSERVACIÓN DE LA ESCORRENTÍA (ADAPTADA DE: [47, 51]) 35
TABLA 3-1. ALGUNOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA SEGÚN DISTINTOS MATERIALES Y ÁREAS DE CAPTACIÓN (ADAPTADA DE: [54]) 49
TABLA 3-2. GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CANALETAS Y BAJANTES DEPENDIENDO DEL ÁREA DE CAPTACIÓN (ADAPTADA DE: [62]) 50
TABLA 5-1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ACTIVO SUPERFICIALES VS. SUB SUPERFICIALES (ADAPTADA DE: [54, 62]) 74
TABLA 5-2. RESULTADOS ESTUDIO [40]. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS PROPUESTOS EN LA REDUCCIÓN DE VOLUMEN DE ESCORRENTÍA (ADAPTADA DE: [40]) 83
TABLA 7-1. RESUMEN DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PARA SISTEMAS ACTIVOS DE ALMACENAMIENTO (ADAPTADA DE: [57, 93]) 109

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El aumento de la precipitación global a causa del Cambio Climático y la urbanización, junto con el déficit de infraestructura de drenaje con respecto al crecimiento poblacional y económico, han hecho que las ciudades en expansión de los países en desarrollo experimenten mayores y más frecuentes inundaciones con relación a periodos pasados. Es por esto, que se necesita abordar el problema del drenaje urbano desde otra perspectiva en la cual se maneje el agua lluvia tan pronto como caiga mediante las prácticas de manejo en la fuente (SMPs). Este estudio pretende establecer el estado del arte de las prácticas que comprenden el almacenamiento, retención y/o detención del agua lluvia a nivel predial para reducir picos y volúmenes de escorrentía, una de los tantos mecanismos de control en la fuente que existen.

Actualmente, las ciudades de los países emergentes (como por ejemplo en América Latina) están experimentando una etapa de crecimiento acelerado. Aun así, y debido a diversos factores tanto culturales como económicos, dicho crecimiento no es siempre homogéneo. Los sistemas de alcantarillado y drenaje son una muestra clara de lo anterior, pues a pesar del desarrollo urbano, gran parte de estas ciudades no cuentan con este recurso que le permita drenar adecuadamente las aguas tanto lluvias como residuales. Por otra parte, los cambios en el uso del suelo (impermeabilización), el aumento de la temperatura global que conlleva a los fenómenos de la isla de calor y cambio climático, han demostrado ser factores determinantes para el aumento de la precipitación y generación de escorrentía. Actualmente, en las ciudades tropicales se está presentando éste fenómeno el cual trae como consecuencia el colapso de los sistemas de drenaje existentes lo cual genera serios problemas de inundaciones. Diversos estudios han demostrado que cambios en el uso del suelo producto de la urbanización, generan mayores volúmenes de escorrentía y reducciones en las tasas tanto de infiltración como de evapotranspiración.

La necesidad de afrontar la gestión de las aguas pluviales desde una perspectiva diferente a la convencional, que combine aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales, está llevando a un rápido aumento a nivel mundial del uso de prácticas de manejo en la fuente (SMPs por Source Management Practices). El empleo de este tipo de prácticas para el control de la lluvia, pretende reducir la escorrentía y los contaminantes de exceso que ingresan dentro de los sistemas de drenaje convencionales. Las prácticas de manejo sostenible en la fuente (SMPs) corresponden a los sistemas alternativos de drenaje urbano. Dentro de estos existen un gran número de tecnologías direccionadas a intentar reestablecer las condiciones hidrológicas pre urbanización mediante la detención/almacenamiento temporal y/o infiltración de la escorrentía. Los SMPs se pueden dividir en dos grandes grupos: 1) los denominados SUDs (Sustainable Urban Drainage Systems) o BMP (Best Management Practices), y 2) los denominados LIDs (Low Impact Developments).

El almacenamiento, retención o detención del agua lluvia es una de las diversas alternativas para reducir los volúmenes de escorrentía, mejorar la calidad del agua e incluso emplearla para consumo humano o reutilización. Corresponde a una práctica sostenible y descentralizada, la cual puede evitar una gran cantidad de problemas ambientales generados por los excesos de agua lluvia, además de traer beneficios socioeconómicos a los países en vías de desarrollo.

En primer lugar, mediante una contextualización o marco teórico se pretende abordar la problemática anteriormente mencionada. Se demuestra que los sistemas de drenaje han crecido a una tasa mucho menor que la población y la economía de los países emergentes. Igualmente, y mediante una exhaustiva recopilación bibliográfica, se profundiza en los distintos fenómenos que han demostrado ser una causa importante para el aumento de inundaciones y volúmenes de escorrentía: urbanización y cambio climático. Por otra parte se analiza el contexto Latinoamericano con el fin de evaluar el aumento de las inundaciones haciendo énfasis en el caso colombiano, específicamente el de la ciudad de Barranquilla. Finalmente, se profundiza en cómo ha sido el cambio de la filosofía de drenaje urbano tradicional hacia una visión mucho más sostenible y ambientalmente amigable, y se describen las prácticas de manejo sostenible en la fuente (SMPs).

Habiendo comprendido la necesidad de realizar esta investigación, y habiendo preparado el marco estipulado para esta, se procede a la profundización. Inicialmente, se van a describir de una forma muy general los sistemas de almacenamiento/retención de agua lluvia a nivel predial. Se profundiza en los distintos tipos y componentes que los conforman, al igual que las consideraciones y criterios básicos para su diseño.

Posteriormente, se divide la investigación de acuerdo con los distintos tipos de sistemas de retención del agua lluvia a nivel predial: almacenamiento pasivo (barriles de lluvia), activo (tanques y cisternas) y modular (unidades modulares ensambladas). Para cada uno de los anteriores se describen sus componentes, tipos y criterios de diseño, se establecen sus ventajas y desventajas frente a los demás, y se evalúa su desempeño y eficiencia en cuanto a los impactos que se generan tanto en la cantidad de la escorrentía aliviada como de la calidad de la misma.

Seguidamente, se profundiza en los aspectos concernientes a la instalación, operación y mantenimiento de cada uno de los sistemas de retención/almacenamiento de la escorrentía a nivel predial. Se describen las prácticas que se deben tener en cuenta y seguir muy cuidadosamente para realizar una adecuada operación y mantenimiento con el fin de asegurar la eficiencia esperada del sistema instalado. Adicionalmente, se describen algunos casos y experiencias reales alrededor del mundo en cuanto a la implementación de estas tecnologías. Se establecen muchos de los criterios de diseño empleados, y la forma mediante la cual se logró que los usuarios implementaran en sus predios estos sistemas (incentivos económicos).

Finalmente, se registran las conclusiones más importantes a las cuales se llegaron en el desarrollo de este proyecto de investigación, y se mencionan algunas recomendaciones u observaciones que pretenden mejorar futuras investigaciones y/o implementaciones de los sistemas de almacenamiento/retención del agua lluvia a nivel predial.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

Como objetivos generales se plantean 2:

- Realizar una consulta bibliográfica extensa mediante la cual se comprendan las principales estructuras de almacenamiento temporal a nivel predial para reducir los picos de caudal en eventos de lluvia.

- Consultar y establecer la forma mediante la cual se ha logrado que los usuarios empleen este tipo de estructuras en sus predios, y profundizar en aspectos concernientes a la operación y mantenimiento de los mismos.

1.2.2. Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar los objetivos generales propuestos en este proyecto de grado, a continuación se numeran los objetivos específicos planteados:

- Establecer el contexto y problemática de la infraestructura de alcantarillado y drenaje urbano en América Latina (en especial de Colombia).

- Analizar el efecto de la urbanización y cambio climático sobre el aumento de la precipitación global y los posibles impactos.

- Contrastar la filosofía de drenaje urbano tradicional frente a las nuevas visiones: manejo centralizado vs manejo en la fuente.

- Entender el funcionamiento de las estructuras de almacenamiento temporal a nivel predial que permiten reducir los picos de caudal y volúmenes de escorrentía en eventos de lluvia.

- Analizar las características generales de estas tecnologías, sus tipos, desempeño/eficiencia, sus variables de diseño y su operación y mantenimiento, entre otras cosas.

- Consultar y analizar distintas experiencias reales y casos de aplicación en cuanto a la implementación de estructuras de almacenamiento a nivel predial.

2. CONTEXTUALIZACIÓN Y MARCO TEÓRICO

2.1. Crecimiento de la Población vs. Infraestructura de Drenaje

Actualmente, las ciudades de América Latina están experimentando una etapa de crecimiento acelerado. Aun así, y debido a diversos factores tanto culturales como económicos, dicho crecimiento no es siempre homogéneo. Los sistemas de alcantarillado y drenaje son una muestra clara de lo anterior, pues a pesar del desarrollo urbano, gran parte de estas ciudades no cuentan con este recurso que le permita drenar adecuadamente las aguas tanto lluvias como residuales. En primera instancia se va a analizar dicho crecimiento demográfico y se va a comparar con aquel que experimenta la urbanización y la infraestructura de drenaje.

A continuación en la Tabla 2-1 y Tabla 2-2 se puede apreciar la evolución de la población de algunos de los países más representativos de América Latina y sus tasas de crecimiento entre periodos intercensales respectivamente.

Tabla 2-1. América Latina: población total según censos (1950-2010) (En miles) (Adaptada de: [1, 2])

País/Country	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010
Argentina	15 894	20 014	23 364	27 950	32 616	36 260	38 747	40 738
Brasil	51 494	72 768	93 138	119 001	147 386	169 799	186 110	195 498
Chile	5 933	7 374	8 885	11 330	13 348	15 116	16 294	17 133
Colombia	11 933	17 444	22 948	27 838	33 110	41 468	43 046	46 299
México	25 779	34 923	48 225	66 847	81 250	97 483	105 001	110 675
Venezuela	5 035	7 524	10 722	14 517	18 105	23 054	26 724	29 499

Tabla 2-2. Tasa media anual de crecimiento de la población total de algunos países latinoamericanos (1950-2010) (por 100 habitantes) (Adaptada de: [1, 2])

País/Country	1950-1960	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2005	2005-2010
Argentina	1.7	1.5	1.8	1.5	1.0	1.2	1.0
Brasil	3.4	2.5	2.5	1.9	1.6	1.7	1.0
Chile	2.5	2.0	2.0	1.6	1.2	1.4	1.0
Colombia	2.9	2.9	1.6	1.4	1.9	0.7	1.5
México	3.0	3.2	3.3	2.0	1.8	1.5	1.1
Venezuela	3.9	3.3	3.0	2.5	2.4	2.2	1.7

Nótese que prácticamente todo los países presentaron un crecimiento demográfico bastante acelerado para los periodos comprendidos entre 1950 y 1980 con tasas de crecimiento promedio de 2.6% anual. A partir de allí, la tendencia ha sido una disminución de las tasas de crecimiento poblacional hasta el periodo 2010 con un valor promedio de 1.5% anual. Aun así, estudios globales han demostrado que la tasa de crecimiento poblacional de Latinoamérica y el caribe fue de 2.64% anual (1950-1975) y de 1.73% anual (1975-2009). Por el contrario, la tasa de crecimiento poblacional promedio global fue de 1.89% anual (1950-1975) y de 1.53% anual (1975-2009) [3]. Lo anterior indica que el crecimiento

poblacional de América Latina siempre ha estado bastante por encima del promedio mundial lo cual debe ser un aspecto importante a tener en cuenta.

Si bien el crecimiento poblacional de América Latina ha sido bastante acelerado a partir de la segunda mitad del siglo XX, es importante analizar el grado de urbanización que ha presentado esta región del mundo. En la Tabla 2-3 se puede apreciar el porcentaje de urbanización, es decir el porcentaje de la población urbana con respecto a la población total. En la Tabla 2-4 se encuentran las tasas medias anuales de crecimiento poblacional urbano y la tasa de urbanización (diferencia entre la tasa de crecimiento de la población urbana con respecto a la total) para el periodo comprendido entre 1950 y 2005. La tasa de urbanización indica la cantidad relativa de población que se agrega al área urbana producto del crecimiento.

Tabla 2-3. Porcentaje de la población urbana de algunos países de América Latina (1950-2010) (Adaptada de: [1, 2])

País/Country	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010
Argentina	62.5	73.8	79.0	83.0	87.2	90.5	91.8	93.1
Brasil	36.5	43.0	55.9	67.6	75.3	81.2	83.4	85.0
Chile	60.7	68.2	75.1	82.2	83.5	86.6	86.6	87.5
Colombia	42.7	52.1	59.1	67.2	71.0	76.0	76.6	78.5
México	42.6	50.7	58.7	66.3	71.3	74.7	76.5	78.0
Venezuela	47.9	62.5	73.1	80.0	84.4	90.5	92.8	93.6

Tabla 2-4. Tasa anual de crecimiento poblacional urbano y tasa media de urbanización (1950-2010) (Adaptada de: [1, 2])

País/Country	Tasa Anual Crecimiento Poblacional Urbano						Tasa Media Crecimiento (1950-2005)	Tasa Urbanización (1950-2005)
	1950-1960	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2005		
Argentina	3.0	2.2	2.3	1.9	1.4	1.5	2.2	0.7
Brazil	5.0	5.1	4.3	2.9	2.4	1.8	4.0	1.6
Chile	3.9	3.0	2.8	1.8	1.6	1.5	2.6	0.7
Colombia	4.4	4.3	2.7	1.9	2.4	2.2	3.3	1.0
México	4.8	4.7	4.5	2.7	2.3	1.7	3.8	1.1
Venezuela	6.5	4.8	3.9	3.1	3.0	2.1	4.3	1.3

En el primer cuarto del siglo XX, la urbanización de América Latina se ubicaba entre los niveles de las regiones más y menos desarrolladas del mundo con un 25%. Durante el medio siglo siguiente (1925-1975) el nivel de urbanización de América Latina se aceleró de manera tan notable (casi del doble) que se aproximó mucho al de las regiones más desarrolladas con un valor cercano al 51% [4]. En el año 2000 América Latina mostró un nivel de urbanización del 75.3%, cercano al del conjunto de las regiones más desarrolladas. Hacia el año 2010 este valor aumentó hasta el 79.5% y se espera que para el 2020 se estabilice en un valor muy cercano al 82% [2], mientras que Asia y África apenas habrán superado el 50 por ciento, un nivel que América Latina había alcanzado a fines de la década de los años 1950.

Como quedó en evidencia, el periodo comprendido entre 1950 y 2000 comprendió el mayor crecimiento demográfico y urbano de América Latina y por consiguiente de Colombia. La tasa media de crecimiento urbano anual colombiana para este periodo fue de 3.3%, y la tasa de urbanización fue del 1.0%, valores que se encuentra bastante por encima de los indicadores globales para este periodo.

A partir del siglo XXI, las tasas de crecimiento tanto poblacional como urbano disminuyeron significativamente lo cual implica que éste periodo no es tan importante para el análisis.

Ahora es importante analizar cómo fue la evolución de la infraestructura de acueducto, alcantarillado y drenaje especialmente en el contexto colombiano para el periodo en cuestión, y de esta manera relacionar su crecimiento con el fenómeno demográfico que estaba experimentando la región.

La provisión de los servicios de acueducto, alcantarillado y drenaje en el período comprendido entre los años 1910 y 1950 se caracterizó por ser principalmente estatal y central. Hacia los años 20 el Estado empezó a intervenir en la prestación de estos servicios. En el año de 1936, mediante la Ley 65, se destina un 1% de los recursos fiscales al sector con el objetivo de expandir la provisión de agua potable [5]. Para ello se crea el Fondo de Fomento Municipal (FFM), entidad encargada de distribuir los recursos en base a las poblaciones departamentales. La incapacidad de los municipios para responsabilizarse del manejo de los sistemas de acueducto, dio lugar a la primera crisis y al cambio de modelo, orientándose hacia uno en el que se fortalecía la participación nacional, extendiéndose al campo de la administración de dichos sistemas [6]. De esta manera se suprime en 1950 el FFM y se reemplaza por una entidad que no solo financia sino que también ejecuta obras: El Instituto de Fomento Municipal (INSFOPAL). De acuerdo con algunos estimativos, durante la década de los 50's la inversión necesaria para atender las necesidades del sector ascendía a 31 millones de pesos de 1951. Las inversiones del INSFOPAL en este periodo fueron de 5.4 millones de pesos, equivalentes a un 16% de lo requerido [5].

En la década de los 70's y 80's la inversión en acueductos y alcantarillados fue de aproximadamente el 16% de la inversión pública total, lo que fue equivalente al 0.5% del PIB total de la nación en ese entonces. La reforma política, que estableció la elección popular de gobernadores en 1986, la acentuación del proceso de descentralización fiscal a partir de ese año y la Constitución Política de 1991, que extiende la elección popular a los alcaldes y permite la participación privada y comunitaria en la prestación de los servicios públicos, abrieron las puertas a modelos más flexibles de gestión de las empresas de acueducto y alcantarillado [6]. Con este nuevo sistema, en la década de los 90's la inversión pública para el sector representó cerca del 0.6% del PIB nacional.

A continuación se presenta una tabla (Tabla 2-5) donde se puede observar la evolución de la cobertura e inversión en los sistemas de acueducto y alcantarillado en Colombia desde la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad, y su comparación frente al crecimiento demográfico.

Tabla 2-5. Evolución de los sistemas de alcantarillado en Colombia: comparación con el crecimiento poblacional (Adaptada de: [5, 6, 7]

Periodo	Tasa Incremento PIB Nacional Anual (%)	Tasa Crecimiento Poblacional Anual (%)	Inversión Sector (% PIB)	Cobertura Alcantarillado y drenaje Total (% Población)
1970-1975	5.68	1.85	0.18	42.3
1975-1980	5.36	1.35	0.29	n.d
1980-1985	2.25	1.33	0.32	59.4
1985-1990	4.59	1.57	0.39	n.d.
1990-1995	4.56	1.85	0.55	63.4
1995-2000	0.96	1.95	0.67*	75.3

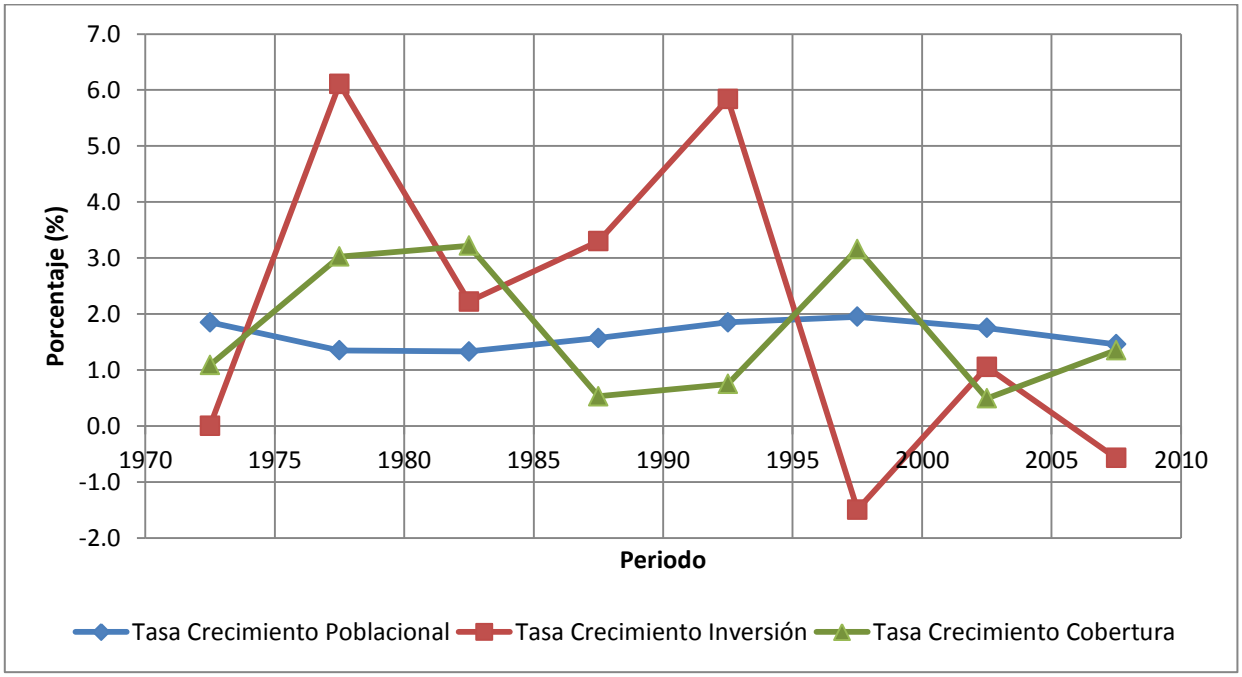
2000-2005	3.37	1.75	0.76*	77.2
2005-2010	4.57	1.46	0.70*	82.8

(*) Participación del PIB sectorial sobre el PIB nacional.

Es importante aclarar que la columna 4 de la tabla anterior se refiere a la inversión en el sector de acueducto y alcantarillado. Es decir se tienen en cuenta ambas infraestructuras. Debido a que este documento se centra en los sistemas de alcantarillado y drenaje, la inversión real para este tipo de infraestructura puede estar del orden de la mitad o de un tercio de lo que efectivamente muestra la tabla.

La Gráfica 2-1 muestra una comparación entre el crecimiento poblacional y el desarrollo de la infraestructura de agua potable y saneamiento básico en Colombia. Para analizar la relación entre ambos crecimientos, se identificaron tres etapas representativas.

En el periodo comprendido entre 1950 y 1975 Colombia y en general América Latina experimentó el mayor crecimiento poblacional tanto urbano como total (promedio de 2.6% anual). Nótese que para este mismo periodo, la inversión en sistemas de acueducto y alcantarillado tan solo era del 0.18% del PIB nacional (valor máximo en 1975) y que muy probablemente era constante o menor para los años inmediatamente anteriores. Para este periodo es claro que existió un déficit en la infraestructura de alcantarillado con respecto a la población, pues ésta última estaba creciendo aceleradamente mientras la inversión pública en el sector no lo hacía. Para este periodo, tan solo se contaba con una cobertura del 42.3% de alcantarillado.



Gráfica 2-1. Comparación evolución de la población vs infraestructura del sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia (1970-2010)

Como se puede apreciar en la gráfica, la inversión sectorial para el periodo comprendido entre 1975 y 1995 creció considerablemente, pues pasó del 0.18% en 1975 al 0.55% en 1995. Asimismo, su tasa de crecimiento siempre se mantuvo por encima de la tasa de crecimiento poblacional lo cual indica

que económicamente el sector estaba creciendo adecuadamente con respecto a la población. En cuanto a la cobertura, sucedió algo bastante similar para el periodo entre 1975 y 1985 pues su crecimiento fue acelerado y mayor que la tasa de crecimiento poblacional. Es decir que para este periodo, el sector experimentó un crecimiento técnico y económico de acuerdo a cómo lo hacía la población. Aun así, entre 1985 y 1995 la cobertura dejó de crecer al ritmo que lo venía haciendo a pesar de que la inversión en el sector estaba creciendo adecuadamente con la población. Lo anterior se puede deber a malos manejos del capital público, y en consecuencia se generó un déficit en el crecimiento de la infraestructura con respecto al crecimiento demográfico. La cobertura de alcantarillado para este último año fue cercana al 63% de la población total.

A partir del siglo XX, se puede apreciar un déficit bastante considerable en cuanto al crecimiento sectorial (tanto económico como técnico) con respecto al crecimiento de la población. Inclusive, la inversión en acueductos y alcantarillados en Colombia llegó a decrecer para este periodo. Es claro que la tasa de crecimiento demográfica se encuentra por encima de las tasas de crecimiento de la inversión y de la cobertura. Lo anterior indica que a pesar de que la cobertura pasó del 75.3 al 82.8% y la participación del sector sobre el PIB nacional pasó del 67 al 70%, un porcentaje importante de la población se quedó sin este servicio.

Actualmente, la cobertura urbana de acueducto y alcantarillado alcanza el 97% y 92% respectivamente, cifras muy cercanas a las metas del 99% y 97% previstas para el año 2015. Por su parte, las coberturas rurales son del 72% y 69% respectivamente, aun lejanas de las metas del 81% y 75% [8]. Sin embargo, grandes ciudades y municipios de Colombia aun presentan grandes problemas de cobertura de saneamiento básico al igual que de drenaje urbano cuando se presentan eventos de precipitación considerables.

2.2. Aumento de Volúmenes de Lluvia: Urbanización y Cambio Climático

El aumento de la temperatura global y el proceso de urbanización que se desarrolla en el mundo han demostrado ser factores determinantes para el aumento de la precipitación y generación de escorrentía. Actualmente, en las ciudades tropicales se está presentando éste fenómeno el cual trae como consecuencia el colapso de los sistemas de drenaje existentes lo cual genera serios problemas de inundaciones y salud pública (en caso de tratarse de alcantarillados combinados). A continuación se va a profundizar sobre estos dos fenómenos y su impacto en el drenaje urbano.

2.2.1. Urbanización

El mundo en desarrollo está atravesando quizá la mayor transición demográfica de su historia, pasando de una sociedad rural y agraria a una urbana e industrial. Para el 2005, el 1.2% de la superficie terrestre era considerada urbana y se espera un crecimiento acelerado tanto de la superficie urbana como de la densidad [9]. Por otra parte, se espera que para el 2025 el 70% de la población global va a habitar en cascos urbanos valor que corresponde a la mitad de lo que se tiene en la actualidad [10]. Prácticamente, todo este incremento va a ocurrir en las sociedades en vía de desarrollo y más de la mitad del crecimiento solo va a ocurrir en dos países: India y China.

2.2.1.1. Cambio en usos del suelo

El drenaje urbano o el drenaje de las ciudades reemplazan una parte del ciclo del agua natural, y por tal razón debe ser analizado en detalle. Cuando el agua lluvia cae en una superficie natural, cierta cantidad retorna a la atmósfera mediante la evaporación o transpiración de las plantas, alguna se infiltra a través del suelo y se convierte en agua subterránea y alguna se transforma en escorrentía. La proporción de la escorrentía generada depende del tipo de superficie y varía con el tiempo dependiendo del evento de lluvia (incrementa a medida que el suelo se satura). Tanto la escorrentía superficial como la subsuperficial drenan hacia el cuerpo de agua más cercano, aunque la superficial lo hace de una manera más rápida. Dicha escorrentía se va a convertir en una contribución al flujo base general del cuerpo de agua más que en volverse parte del incremento del flujo debido a cualquier evento de lluvia particular [11].

Los cambios en el uso de la tierra asociados con la urbanización generan un profundo impacto en el ciclo hidrológico de las cuencas urbanas debido a la introducción de superficies impermeables, remoción de vegetación y alteraciones en la red de drenaje [12]. Las superficies impermeables incrementan la cantidad de escorrentía superficial generada en relación con la infiltración, y como consecuencia, aumenta el volumen total de agua que llega al cuerpo receptor durante un evento de lluvia. La escorrentía superficial viaja a través de las superficies impermeables y el sistema de alcantarillado a una tasa mucho mayor a la cual lo hace bajo condiciones naturales de pre-urbanización. Lo anterior implica que el flujo de agua va a llegar mucho antes y que por lo tanto el pico de caudal será mayor para un evento de lluvia. Por otra parte, la reducción de la infiltración implica bajas recargas a las aguas subterráneas [11].

En la Figura 2-1 se puede apreciar el destino del agua lluvia para las condiciones de pre-urbanización y post-urbanización. Nótese que cómo se dijo antes, para las condiciones de post-urbanización, la evapotranspiración y la infiltración se reducen y en contraposición la escorrentía superficial se incrementa sustancialmente producto de las superficies impermeables y remoción de vegetación principalmente.

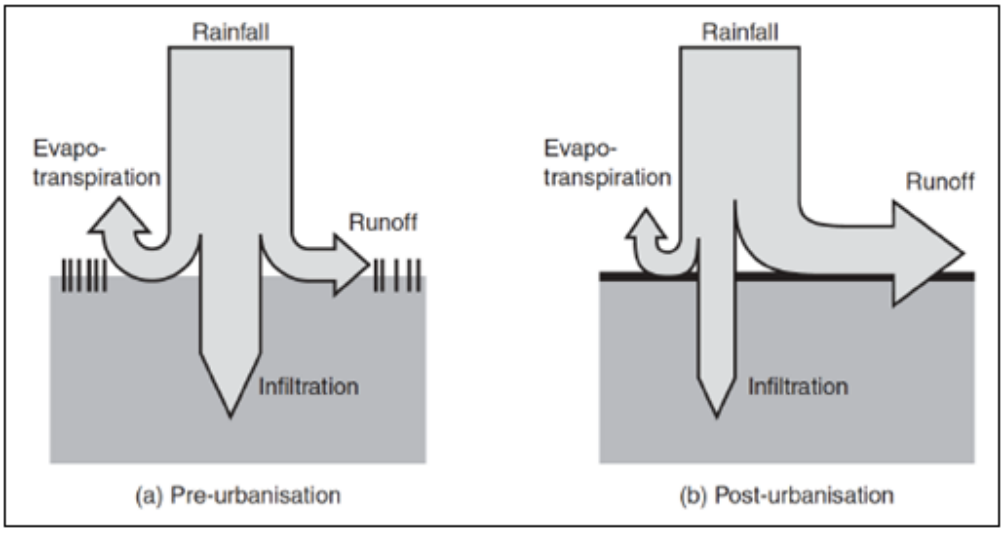


Figura 2-1. Efecto de la urbanización sobre el destino del agua lluvia (Fuente: [11])

Por otro lado, en la Figura 2-2 se pueden observar las diferencias entre las tasas de generación de escorrentía para las condiciones pre y post urbanización. Como se mencionó anteriormente, a medida que se incrementa la urbanización y las áreas impermeables, el pico de escorrentía se genera más rápidamente (en un tiempo muy corto) y con caudales muchísimo mayores.

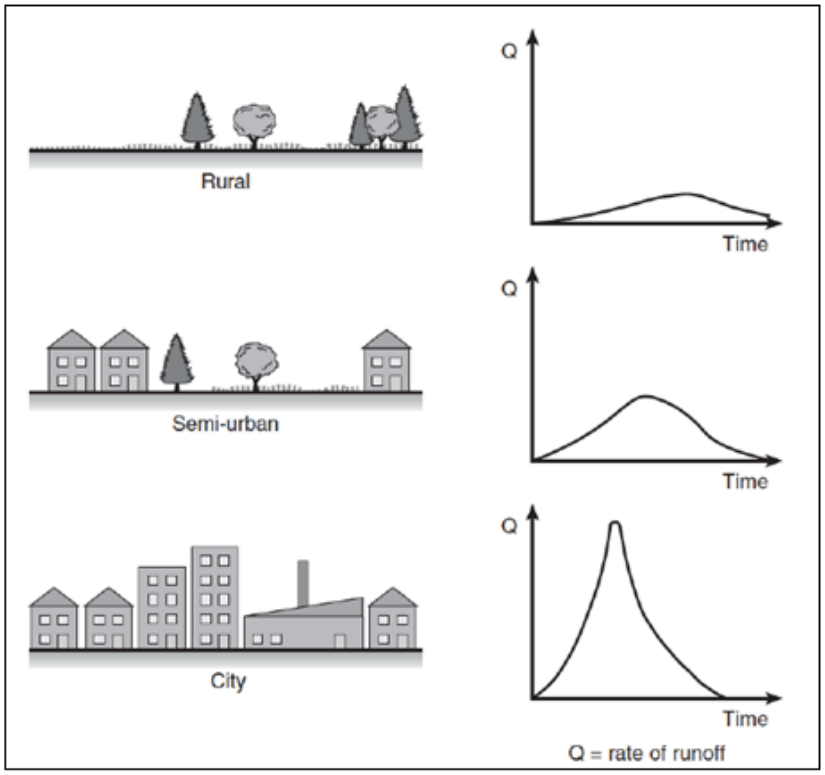


Figura 2-2. Efecto de la urbanización en la tasa de escorrentía generada (Fuente: [11])

Diversos estudios han demostrado que cambios en el uso del suelo producto de la urbanización, generan mayores volúmenes de escorrentía y reducciones en las tasas tanto de infiltración como de evapotranspiración. Por ejemplo, [13] caracterizaron tres pequeñas subcuencas que representaban un rango de desarrollo urbano (sin desarrollo, desarrollo medio y desarrollo alto) cercanas al río Croton en Nueva York, Estados Unidos. Ellos pudieron demostrar que durante eventos de lluvia los picos de escorrentía se incrementaban y los tiempos de transporte se reducían notablemente a medida que la urbanización fuera mayor (mayor efecto para condiciones húmedas que secas). Por otra parte, también relacionaron la tasa de generación de escorrentía con la intensidad de la lluvia, llegando a la conclusión que a medida que ésta última fuera mayor, también lo hacía el pico de la escorrentía para un mismo periodo de tiempo (acentuándose para lugares con pendientes mayores). Igualmente, llegaron a la conclusión de que en las lluvias menos fuertes (con mayor probabilidad de excedencia) el efecto de la urbanización se hace mucho más pronunciado en cuanto a la generación de escorrentía que las lluvias más fuertes (con menor probabilidad de excedencia). Diversos estudios [12, 14, 15] también han llegado a la misma conclusión y han logrado obtener la relación entre el grado de urbanización, generalmente medido como el porcentaje de área impermeable, y el coeficiente de escorrentía. Asimismo y mediante modelos basados en hidrología y modelos que integran el agua superficial y subterránea (process-based models) también se han podido determinar que los tiempos de concentración de la escorrentía disminuyen a medida que el grado de impermeabilización es mayor.

A continuación (Figura 2-3 y Figura 2-4) se pueden apreciar algunos de los resultados y las conclusiones más importantes a los cuales llegaron los estudios mencionados anteriormente.

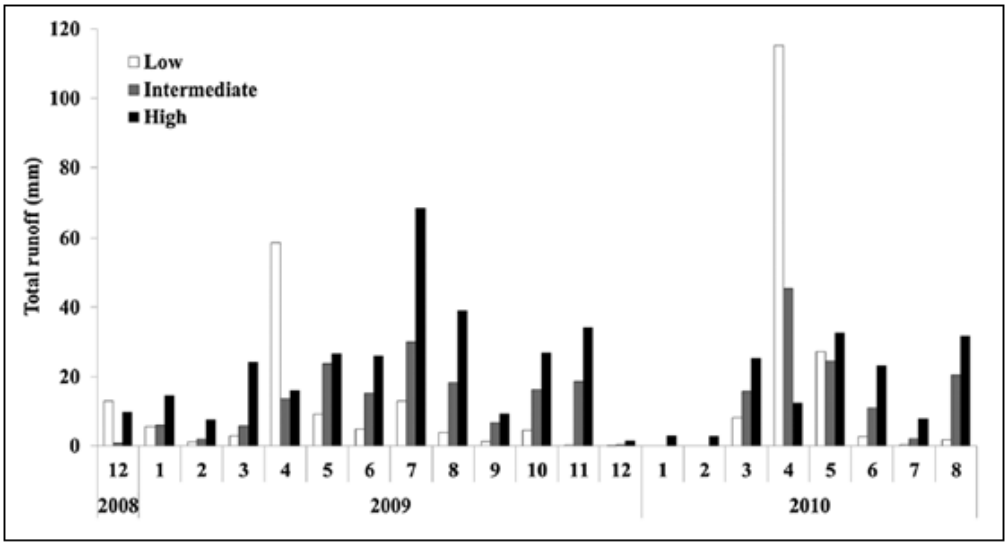


Figura 2-3. Escorrentía mensual medida para el periodo de estudio con respecto a los tres escenarios de urbanización (Fuente: [14])

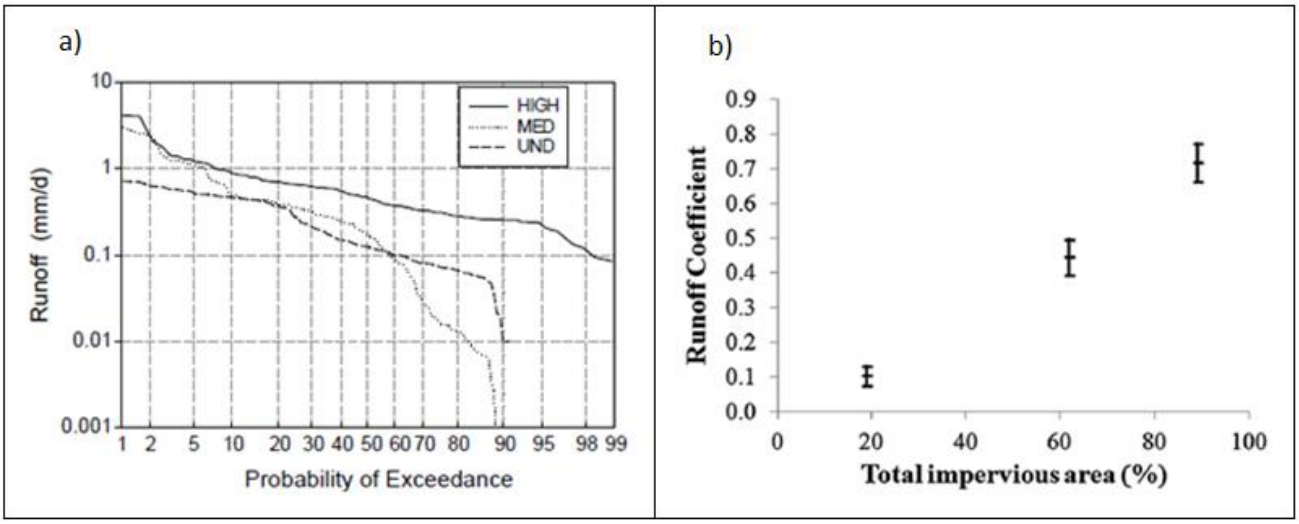


Figura 2-4. a) Relación entre la escorrentía generada y el grado de urbanización dependiendo de la probabilidad de excedencia de la lluvia (Fuente: [13]), b) Efecto del porcentaje de área impermeable en los coeficientes de escorrentía (Fuente: [14])

Si se tiene en cuenta el balance total de una cuenca, cambios en los usos del suelo no solo generan aumentos en los volúmenes de escorrentía, sino que también causan disminuciones importantes tanto en la evaporación como en la infiltración. Es más, la alta generación de escorrentía urbana es producto precisamente de estas disminuciones causadas a su vez por la introducción de superficies impermeables. Entre muchos estudios, dentro de los cuales se destacan algunos [12, 16, 17, 18], se ha podido demostrar que la implementación de superficies impermeables ha generado efectos significativos en las pérdidas evaporativas y recarga de las aguas subterráneas. Por ejemplo, [12] han demostrado que se han reducido las pérdidas evaporativas anuales promedio desde el 83% de la infiltración en condiciones de pre-urbanización, a 3.5%, 14% y 29% para condiciones de

urbanización alta, media y baja respectivamente para una cuenca del rio Southern en el occidente de Australia.

A continuación (Figura 2-5) se pueden apreciar algunos de los resultados y las conclusiones más importantes a los cuales llegaron los estudios mencionados anteriormente.

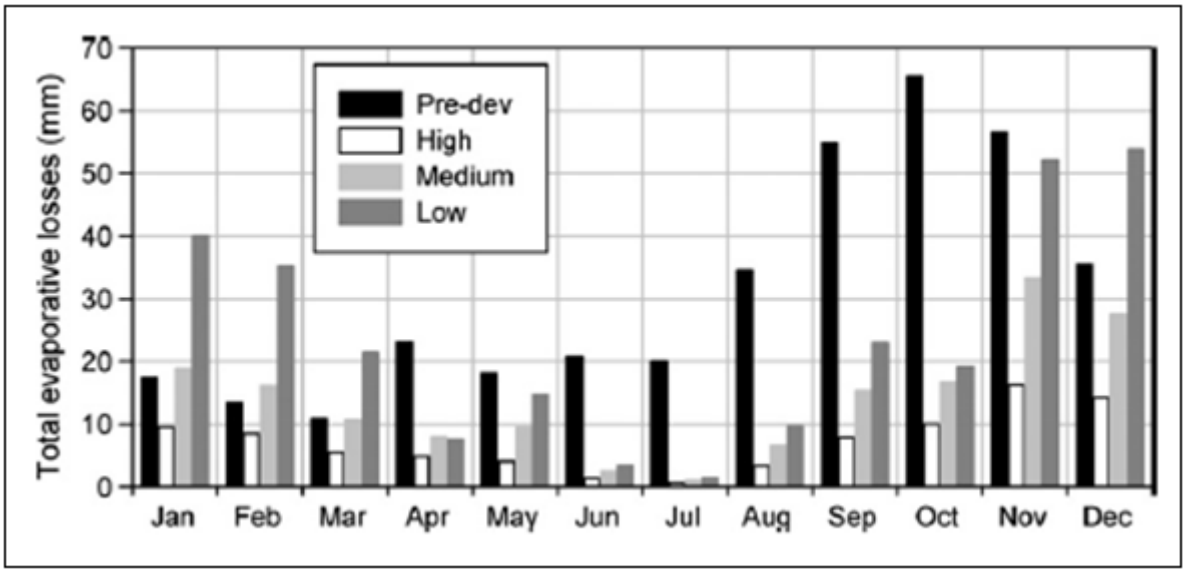


Figura 2-5. Pérdidas por evaporación mensuales para condiciones de pre-desarrollo y los tres escenarios de urbanización (Fuente: [12])

2.2.1.2. Islas de calor

El calentamiento global que actualmente se está generando probablemente por las actividades antropogénicas debido a la urbanización y desarrollo, se ha convertido en un tema público e internacional que despierta gran interés. Una de las modificaciones más evidentes que introduce la urbanización en la temperatura de la atmósfera de las ciudades es el fenómeno conocido como isla urbana de calor (UHI). Este fenómeno hace referencia a que, principalmente durante noches y madrugadas sin viento y escasa nubosidad, las ciudades suelen ser más cálidas que el medio rural que las rodea [19]. Las islas de calor han tenido alguna influencia en estimativos de la temperatura media global y se han calculado de ser no más del 0.1°C durante las primeras 8 décadas del siglo XX. Este estimativo ha resultado ser del orden del 7% del calentamiento total observado [20].

Las grandes áreas urbanas alteran los procesos atmosféricos en diversas maneras. Uno de los principales mecanismos es precisamente mediante la creación de las islas de calor (UHI). Como se mencionó anteriormente, como producto de la urbanización, las superficies naturales son reemplazadas por superficies artificiales que tienen diferentes propiedades térmicas (capacidad calorífica e inercia térmica). Dichas superficies tienen una capacidad mucho mayor de almacenar la energía solar y convertirla en energía sensible. A medida que la energía sensible es transferida al aire, la temperatura del aire en las áreas urbanas tiende a ser 2°C-6°C mayor que el área rural circundante [9].

Para comprender mejor los orígenes del fenómeno de las UHI es necesario analizar la ecuación de balance energético para una superficie [9]:

$$Q_{SW} + Q_{LW} + Q_{SH} + Q_{LE} + Q_G + Q_A = 0$$

Ecuación 2-1.

En la Ecuación 2-1, los términos Q_{SW} (radiación de onda corta neta), Q_{LW} (radiación de onda larga neta), Q_{SH} (flux superficial de calor sensible), Q_{LE} (flux de calor latente turbulento), Q_A (calor antropogénico) y Q_G (calor de conducción del suelo), sintetizan la ecuación de balance energético. Como consecuencia de esta ecuación, es necesaria una temperatura superficial que equilibre la relación. En el caso de las islas de calor, la diferencia entre las propiedades de las superficies genera una diferencia entre los flujos energéticos de la Ecuación 2-1. En la Figura 2-6 se puede apreciar una descripción cualitativa del balance energético superficial para condiciones urbanas y no urbanas. Nótese que ambos escenarios adquieren la energía a través de la radiación solar y la pierden en la atmósfera superior. En la Figura 2-6, se puede observar la capacidad de las superficies urbanas para absorber mayores cantidades de energía con respecto al escenario rural.

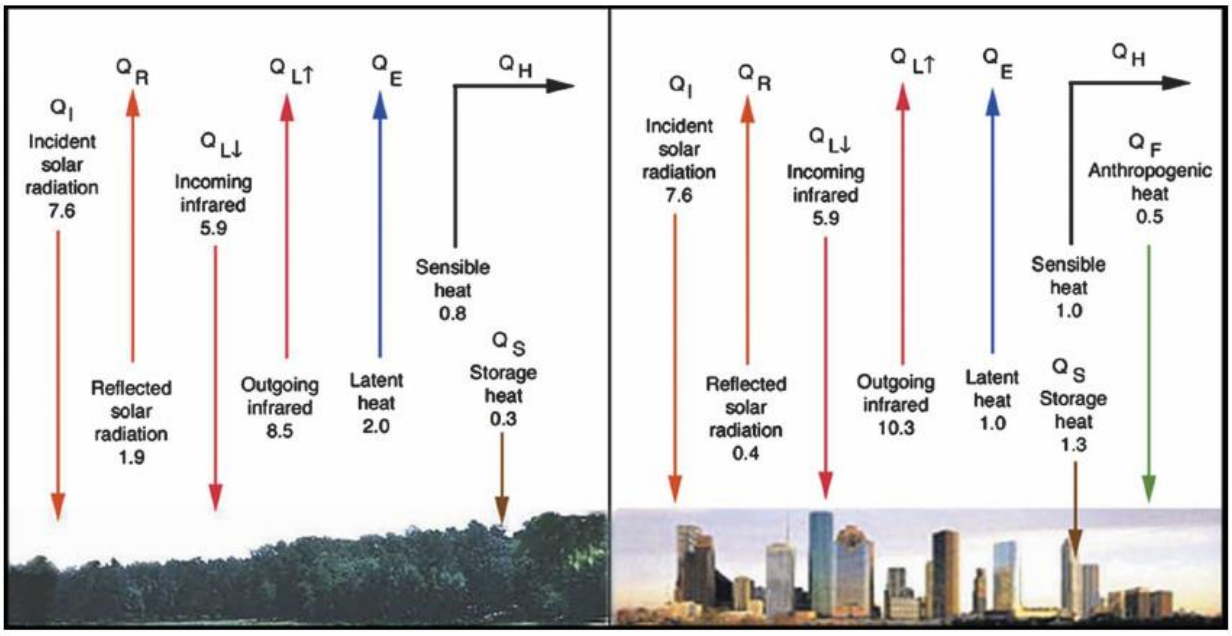


Figura 2-6. Análisis cualitativo del balance energético superficial bajo 2 escenarios: urbanizado y no urbanizado (Fuente: [9])

Aun así, el fenómeno de las islas de calor puede ser atribuido muchos otros diversos factores. Según Sheperd, las diferencias del albedo superficial y el calor antropogénico también juegan un papel importante. Según Camilloni, 2010 y otros estudios [20, 21], enumeraron unos factores adicionales a los cuales se les puede atribuir este fenómeno:

- Alteraciones en los balances energéticos generando anomalías térmicas positivas.
- Incremento en la absorción de la radiación de onda corta debido a la geometría de las ciudades.
- Absorción y reemisión hacia el suelo de la radiación terrestre a causa de la contaminación atmosférica.

- Calor antropogénico y actividades humanas (combustión).
- Incremento en el almacenamiento del calor sensible
- Decrecimiento de la evapotranspiración debido a la deforestación y materiales de construcción.
- Decrecimiento del transporte turbulento total de calor debido a las reducciones en las velocidades del viento causado por la geometría de las ciudades.

La intensidad de las UHI se evalúa como la diferencia observada en un instante determinado entre la temperatura medida en el centro de la Ciudad (Tu) y la del área rural próxima (Tr). Esta intensidad varía con la hora del día y con la estación del año, y depende también de otros factores meteorológicos, como el viento y la nubosidad, y de factores urbanos, como la densidad de las construcciones o el tamaño de la ciudad [19]. Según Camilloni, 2010 y Sheperd, 2005, la máxima intensidad se produce entre 4 y 6 horas después de la puesta del Sol, mientras que durante el mediodía y las primeras horas de la tarde la diferencia suele ser mínima e, incluso, la temperatura puede ser inferior a la rural.

En los últimos 30 años, diversos estudios climatológicos han hipotetizado que las islas de calor (UHI) pueden tener una influencia significativa en las circulaciones atmosférica (mesósfera) generando una mayor convección y aumento de la precipitación. En los artículos de Shepherd, 2005; Shepherd, et al., 2002 y Lin, et al., 2011 se encuentran registrados los estudios más relevantes de los últimos 40 años acerca del impacto que juegan las UHI en las variaciones de precipitación. En general, la mayoría de estudios ha llegado a resultados similares demostrando que las precipitaciones se han venido incrementando en los grandes centros urbanos como consecuencia del efecto de las islas del calor. Actualmente se cree que el impacto que se genera sobre la precipitación o convección producto del desarrollo urbano, se debe a una combinación de los siguientes factores [9]:

- Incrementos en la convergencia atmosférica debido al aumento de la rugosidad superficial en ambientes urbanos.
- Inestabilidad atmosférica causada por la perturbación térmica de las UHI en la capa límite lo que resulta en la baja circulación de las UHI generando nubes convectivas.
- Aumento en la generación de aerosoles urbanos lo que provoca nucleos de condensación y mayor cantidad de nubes.

Por ejemplo, en un estudio realizado en 2002 [21], se analizó el comportamiento de la precipitación de varias ciudades importantes de Estados Unidos (Atlanta, Montgomery, Nashville, San Antonio y Dallas) durante un periodo de 2 años. Los resultados arrojaron que la precipitación media se incrementó un 28% a lo largo de un radio de 30-60 km de las ciudades, con un incremento del 5.6% dentro de las metrópolis. Concluyeron, que lo anterior se debía principalmente al calentamiento de las ciudades producto de las UHI lo que generaba una inestabilidad y convectividad atmosférica en las áreas cercanas a la ciudad hacia donde soplaba el viento. Otros estudios en 2003 [22, 23], lograron demostrar evidencias pasadas acerca del incremento de la precipitación en el área metropolitana de la ciudad de Tokyo y lograron atribuirle este fenómeno a incrementos en la convectividad atmosférica debido a los efectos de las islas de calor.

2.2.2. Cambio Climático

El Cambio Climático es una variación persistente del clima durante un período largo de tiempo (algunas décadas) que se produce debido a causas naturales y humanas. Entre los factores naturales que producen cambios en el clima se destacan las variaciones en la cantidad de energía solar que llega a la Tierra, las modificaciones en la composición química de la atmósfera por efecto del vulcanismo y las alteraciones en la distribución de las superficies continentales que se producen por lentos procesos geológicos [19].

Por otro lado, los cambios debidos a factores humanos se deben a alteraciones de la superficie terrestre, tales como el reemplazo de la cobertura natural por ciudades, construcción de embalses y deforestación. También debido a cambios en la composición química de la atmósfera producidos por la inyección de gases que potencian el efecto invernadero natural, principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) [19, 24].

La evidencia del calentamiento global ha demostrado que la temperatura superficial media de la Tierra ha aumentado 0.6º C desde el inicio del siglo XX y ha aumentado 0.4 º C desde 1970. El año 1998 resultó ser el más caliente registrado y 11 de los 12 años comprendidos entre 1995 y 2006 se encuentran dentro de los 12 años más calientes de la historia. [11]. El IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) ha concluido en el 2007, que el calentamiento global registrado en los últimos 50 años se debía principalmente a la emisión de gases de efecto invernadero de origen antropogénico.

Entre muchas de las consecuencias que la Tierra experimenta a causa del Cambio Climático, los procesos hidrológicos, específicamente la precipitación, han venido presentando alteraciones importantes con respecto a registros históricos del siglo XX. En la Figura 2-7 se puede apreciar un esquema explicativo que resume el incremento de la precipitación global a causa del cambio climático. Se cree que el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado el forzante radiativo, es decir que ha incrementado el cambio en el equilibrio entre la radiación entrante en la atmósfera y la radiación saliente (calentamiento global) [25]. Este aumento de la temperatura terrestre ha provocado un aumento en las tasas de evaporación aumentando la capacidad de la atmósfera para contener vapor de agua. Esto hace que de una u otra forma se intensifique el ciclo hidrológico lo cual ha generado una potenciación del efecto invernadero, un aumento considerable de la precipitación y nubosidad y ha generado impactos regionales tales como inundaciones y sequías.

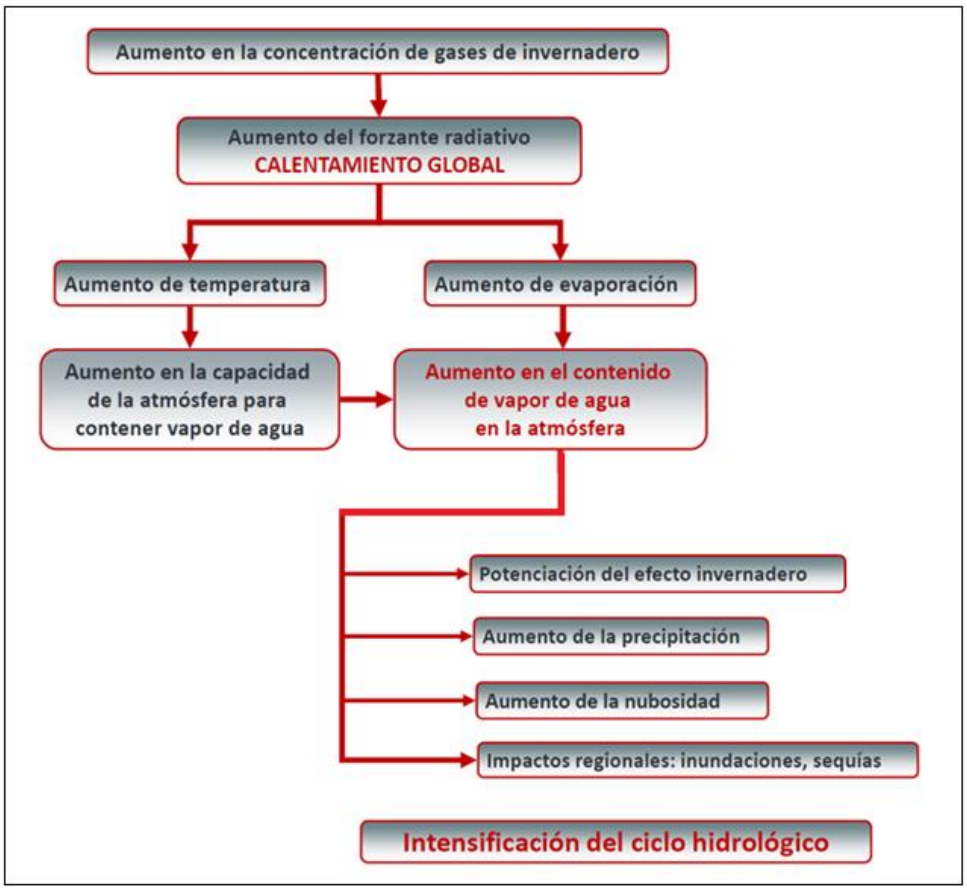
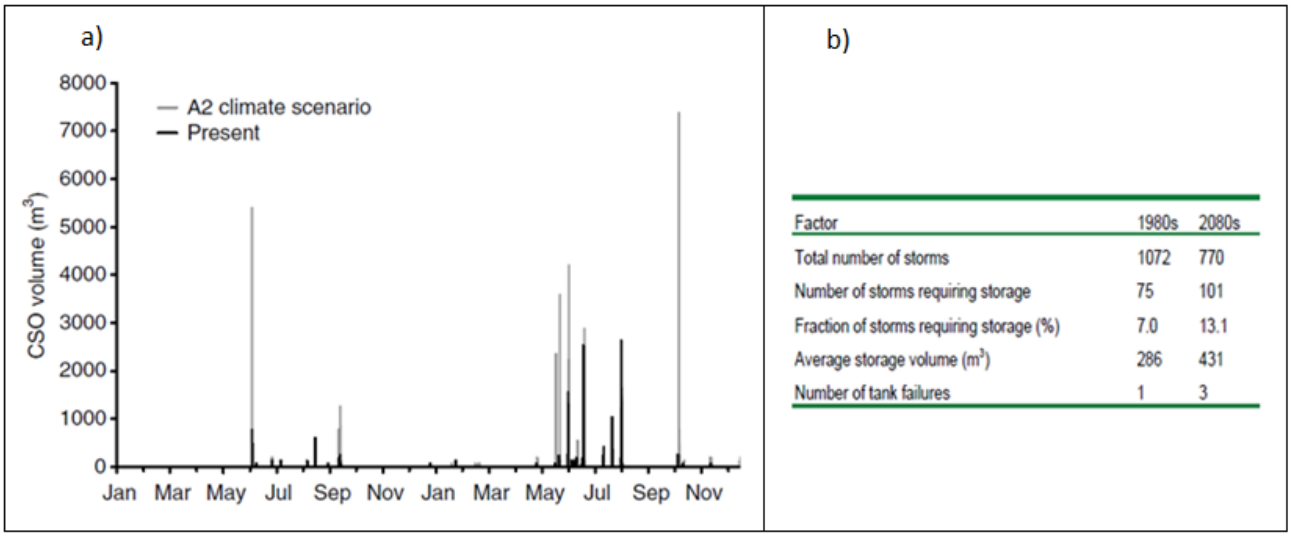


Figura 2-7. Explicación del aumento de la precipitación global a consecuencia del cambio climático (Adaptada de [25])

El Cambio Climático se ha convertido en un reto para el drenaje urbano, pues se ha demostrado que este fenómeno juega un papel importante en la variabilidad de la precipitación. Según escenarios de cambio climático desarrollados por la IPCC, el incremento de la temperatura llevará a incrementos en las precipitaciones medias anuales de alrededor del 10% al finalizar este siglo con incrementos de hasta el 35% en épocas de invierno y bajo el escenario de mayores emisiones [11]. Vale la pena destacar dos estudios [26, 27], en los cuales se ha podido establecer las implicaciones que generarían distintos escenarios de cambio climático en el drenaje urbano de las ciudades, específicamente en sus estructuras. Butler, et al., 2007 modelaron el efecto que tendría un escenario medio de cambio climático de la IPCC con respecto al desempeño de un tanque de almacenamiento en un sistema de alcantarillado para un caso de estudio en la ciudad de Londres. Allí, encontraron que el modelo predijo un 35% de incremento en el número de eventos de lluvia que causaban el rebosamiento del tanque, y un 57% de incremento en el volumen promedio requerido para el almacenamiento. Por otra parte, Semadeni-Davies, et al., 2008, encontraron que sin tener en cuenta los efectos de la urbanización creciente, los sitemas de drenaje actual de la ciudad de Helsingborg, presentarían un aumento en sus problemas de capacidad al implementar un modelo de cambio climático. También concluyeron que bajo un escenario combinado (Cambio Climático + urbanización) el modelo arrojaba el peor escenario posible en cuanto a la capacidad de los sistemas combinados de drenaje de la ciudad, pues los volúmenes de agua se pordrían incrementar en un 450%. En la Figura 2-8, se pueden apreciar algunos de los resultados obtenidos por los estudios anteriormente mencionados.



Factor	1980s	2080s
Total number of storms	1072	770
Number of storms requiring storage	75	101
Fraction of storms requiring storage (%)	7.0	13.1
Average storage volume (m^3)	286	431
Number of tank failures	1	3

Figura 2-8. a) Comparación de los volúmenes totales de los sistemas combinados de drenaje para la ciudad de Helsingborg, Suecia (2001-2002) para un escenario combinado futuro (cambio climático + urbanización) (Fuente: [27]), b) Comparación de la capacidad de almacenamiento de las estructuras de drenaje de Londres con respecto a la lluvia de 1980 y un escenario climático futuro (Fuente: [26])

En general, los estudios realizados con respecto al impacto que generaría el cambio climático en el drenaje urbano tienen que ver con aumentos en las precipitaciones (aumento escorrentía) y en la intensidad de las mismas. Butler & Davies, 2011 plantearon 6 potenciales implicaciones que lo anterior puede generar en la infraestructura de drenaje existente:

- Incremento en volúmenes y tasas de flujo que pueden exceder la capacidad de alcantarillados existentes causando sobrecargas más seguido.
- Mayor deterioro de alcantarillados debido a la mayor frecuencia de las sobrecargas.
- Mayor frecuencia de rebosamiento en estructuras de almacenamiento que hacen parte de alcantarillados combinados.
- Mayor movilización de contaminantes superficiales.
- Peor calidad del agua en cuerpos receptores debido a la mayor frecuencia de rebosamiento de las estructuras de almacenamiento.
- Mayores volúmenes de agua residual diluida que llega a las plantas de tratamiento y que empeoraría el proceso biológico de las mismas.

2.3. Aumento de las Inundaciones

El aumento de la precipitación global a causa del Cambio Climático y la urbanización, junto con el déficit de infraestructura de drenaje con respecto al crecimiento poblacional y económico, han hecho que las ciudades en expansión de los países en desarrollos experimenten mayores y más frecuentes inundaciones con relación a periodos pasados. Desde mediados de los años 90, ciudades como México DF, San Pablo, Bogotá, Lima, Río de Janeiro y Buenos Aires, todas con varios millones de habitantes, vienen llevando a cabo proyectos multimillonarios en materia de infraestructura básica para hacer frente a un legado de degradación ambiental y de insuficiencia de obras y medidas para mejorar y ampliar el suministro de agua y redes de alcantarillado existente, como también para el

tratamiento de las inundaciones. Aun así, el enfoque con el cual tradicionalmente se abordan los problemas del drenaje pluvial urbano y la gestión de inundaciones en la región muestra aún gran retraso [28].

En la actualidad, las inundaciones se pueden catalogar como el desastre natural más frecuente. El número de inundaciones como desastre reportadas en el mundo ha crecido considerablemente, en especial en los últimos 20 años. En la Figura 2-9 se puede apreciar precisamente este aumento a lo largo del tiempo, y con respecto a distintas zonas del mundo. De la misma forma como el número de desastres por inundaciones ha aumentado, también lo ha hecho el número de personas afectadas y las pérdidas económicas. Tan solo para el año 2010, 178 millones de personas fueron afectadas y las pérdidas económicas totales para los años excepcionales de 1998 y 2010 superaron los 40 mil millones de dólares [29].

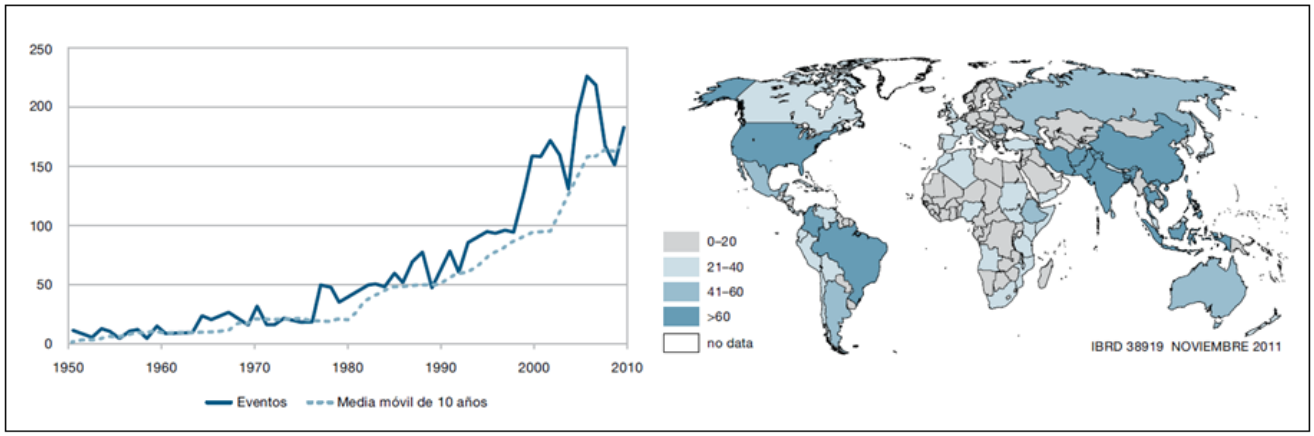


Figura 2-9. Evolución del número de desastres por inundaciones reportadas en el mundo y su distribución desde 1970 hasta 2011 (Adaptada de [29])

Como se puede observar en la figura anterior, Latinoamérica (especialmente México, Brasil, Colombia y Argentina) se encuentran dentro de las zonas con mayores eventos de inundaciones reportadas desde 1970. Lo anterior no es sorprendente si se tiene en cuenta que se trata de países en vías de desarrollo, que han tenido un proceso de urbanización y densificación importante, y que cuentan con sistemas insuficientes de alcantarillado. A continuación se van a exponer las principales inundaciones y la situación actual de algunos países latinoamericanos.

2.3.1. Caso Argentina

De acuerdo con el Banco Mundial (2000), Argentina, dentro del contexto mundial, se encuentra entre los 14 países más afectados por catástrofes de inundaciones rurales y/o urbanas, alcanzando pérdidas superiores al 1,1 % del PIB nacional [30]. Se estima que a partir de 1957 han ocurrido 12 episodios severos (uno cada cuatro años), que han ocasionado muertes, pérdidas económicas y de infraestructura considerables, disminución de la producción agropecuaria y afectación de bienes privados y de la actividad económica.

Las inundaciones urbanas en Argentina se pueden clasificar de acuerdo con su localización geográfica. En primera instancia vale la pena destacar aquellas inundaciones que se han venido

presentando en las ciudades localizadas sobre las márgenes del río Paraná (Posadas, Resistencia, Corrientes, Paraná, Santa Fe y Rosario). En esta región, las precipitaciones anuales promedio son del orden de 1300 mm presentando una mayor intensidad en el semestre comprendido entre Octubre y Marzo. La catástrofe de la ciudad de Santa Fe ocurrida en Abril-Mayo de 2003 y las constantes precipitaciones en la ciudad de Resistencia en la cual lluvias de 25 mm producen, en media hora, inundaciones prácticamente todas las calles, son dos de los eventos más destacados en cuanto a inundaciones de esta región argentina. Desde 1990, en todas las ciudades del río Paraná se han venido realizando estudios y obras que buscan minimizar los impactos de este tipo de inundaciones. Aun así, siguen existiendo problemas, fundamentalmente los ligados al crecimiento urbano, a la falta de planificación urbana, a la interacción de infraestructura con cursos fluviales y al empleo de obras de conducción como la única solución al drenaje pluvial [30].

Igualmente, se han presentado y aun se siguen presentando inundaciones en Buenos Aires y el conurbano Bonaerense. En las últimas décadas la ciudad de Buenos Aires se ha venido inundando frecuentemente generando serios inconvenientes y daños materiales importantes. Básicamente, se citan tres causas básicas asociadas con esta problemática: las crecientes naturales de los cursos de agua que atraviesan la ciudad y los problemas estructurales de la red de desagües, cuya capacidad ha sido superada por la ocupación no planificada de los valles de inundación, los fuertes vientos del sector sudeste (“sudestadas”) que producen un crecimiento del río de la Plata por encima de su media normal, anegando las zonas costeras, y el ascenso del nivel freático que ocasiona inundaciones de construcciones subsuperficiales, entre otros [31].

En cuanto al área central del país, la mayoría de los centros urbanos sufre la problemática de las inundaciones derivadas de causas similares a las expuestas anteriormente. En esta región se han registrado importantes inundaciones urbanas derivadas de los aportes hídricos provenientes de áreas rurales aledañas. Por otro lado, durante la última década las tormentas estivales de tipo convectivo han desencadenado verdaderas catástrofes en áreas urbanas, causando importantes pérdidas humanas y económicas [30].

2.3.2. Caso México

La ciudad de México D.F. es una de las áreas urbanas de mayor extensión y densidad poblacional (19.5 millones de habitantes). Durante las últimas décadas, en su área metropolitana se han aumentado considerablemente las inundaciones. La precipitación anual aumentó de 600 a más de 900 milímetros en la segunda mitad del siglo XX, al igual que el número de inundaciones que pasó de entre uno y dos eventos anuales a entre seis y siete. También se han incrementado los impactos de las inundaciones, debido en gran parte a la forma en la que ocurre el crecimiento urbano y espacial, pues los habitantes de los asentamientos informales son particularmente vulnerables ya que habitan en zonas no planificadas y propensas a inundaciones y deslizamientos [29]. Los factores que han venido causando las inundaciones recientes en la ciudad de México D.F. son los siguientes: Problemas asociados con las lluvias convectivas del valle de México, que han aumentado en su intensidad aunque siguen teniendo la misma duración y extensión. Problemas en las barrancas de los ríos urbanos, muchos de los cuales todavía se encuentran en su estado natural y generan desbordamientos incontrolados y zonas de alto riesgo. Problemas con el sistema de drenaje existente, pues en muchas zonas la capacidad de las redes secundarias, y en muchos casos primarias, resulta ineficiente durante el pico máximo de la lluvia. Problemas en zonas bajas en las cuales la escorrentía tiende a

acumularse de forma natural, pues allí se han asentado desarrollos urbanos [32]. Tal fueron los impactos que el gobierno municipal de la ciudad de México tuvo que desarrollar el Programa de Medidas de Adaptación al Cambio Climático, para controlar las inundaciones.

Por otro lado, desde siempre la ciudad de Morelia ha vivido diversos episodios de inundaciones; sin embargo, en los últimos diez años la problemática se ha aumentado a tal punto que las comunidades no han sido capaces de recuperarse a sus efectos. El proceso de urbanización de la ciudad se extendió hacia la periferia, lugares que antes eran destinados a actividades agropecuarias. Diversos asentamientos se situaron sobre los límites naturales de los principales ríos (río Grande y río Chiquito), antiguas ciénegas y depresiones naturales de captación de agua. Lo anterior ha causado que en los últimos años la incidencia de inundaciones en la periferia de la ciudad haya cobrado innumerables pérdidas materiales y económicas. Entre las inundaciones que han afectado seriamente a la ciudad de Morelia vale la pena destacar la ocurrida en el 2002, como consecuencia de tormentas severas y dejando pérdidas de aproximadamente 4 millones de dólares. Otro evento de inundación registrado en septiembre de 2003, producto también de tormentas fuertes, ha sido considerado como el segundo de acuerdo con su proporción. En el año 2005 se presentaron las mayores inundaciones registradas, que ocasionaron daños en viviendas e infraestructura, suspensión de servicios, y disposición de albergues para los ciudadanos de la periferia de la ciudad [33]. Los antecedentes obtenidos de la ciudad de Morelia indican que la mala localización de asentamientos, el incremento de la superficie urbana, la calidad de la vivienda, las precipitaciones de gran intensidad y magnitud y la falta de capacidad del sistema de drenaje, han incrementado el riesgo de desastre por inundaciones en la periferia de la ciudad.

Tabasco es una de las 32 entidades federativas de México. Es importante destacar las inundaciones de Tabasco en los años 2007 y 2008. La inundación de octubre del 2007 produjo un cubrimiento de agua del 62% del territorio total y un 75% de población damnificada en 679 localidades de 17 municipios del estado. Tuvo un grave impacto socioeconómico a nivel estatal, social, ambiental y de infraestructura [34]. Entre las causas de estas importantes inundaciones se subrayan aquellas propiciadas por la naturaleza (aumento en intensidad de precipitaciones) y las influenciadas por la actividad humana (incapacidad del sistema de drenaje existente y crecimiento urbanístico acelerado).

2.3.3. Caso Colombia

Las inundaciones reportadas en Colombia han venido aumentando considerablemente desde 1970, pues la información sobre desastres naturales a partir de este periodo representa el 91% del total de la base de datos DesInventar[1] y la evaluación de los efectos de las inundaciones en este periodo, se basa en un promedio de 600 reportes. En la Figura 2-10 se puede observar la evolución de los eventos de inundación reportados y el número de personas afectadas por estos en Colombia a partir de 1970. Nótese cómo el comportamiento ha sido creciente en los últimos años, lo cual permite inferir que para los años futuros tanto el número de inundaciones como el de personas afectadas va a ser mayor si no se toman las medidas respectivas.

[1] DesInventar es el Sistema de Inventario de Desastres de América Latina. Creado en 1994 por LA RED (Red de estudios sociales en prevención de desastres de América Latina), Corporación OSSO y EIRD. (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de la ONU).

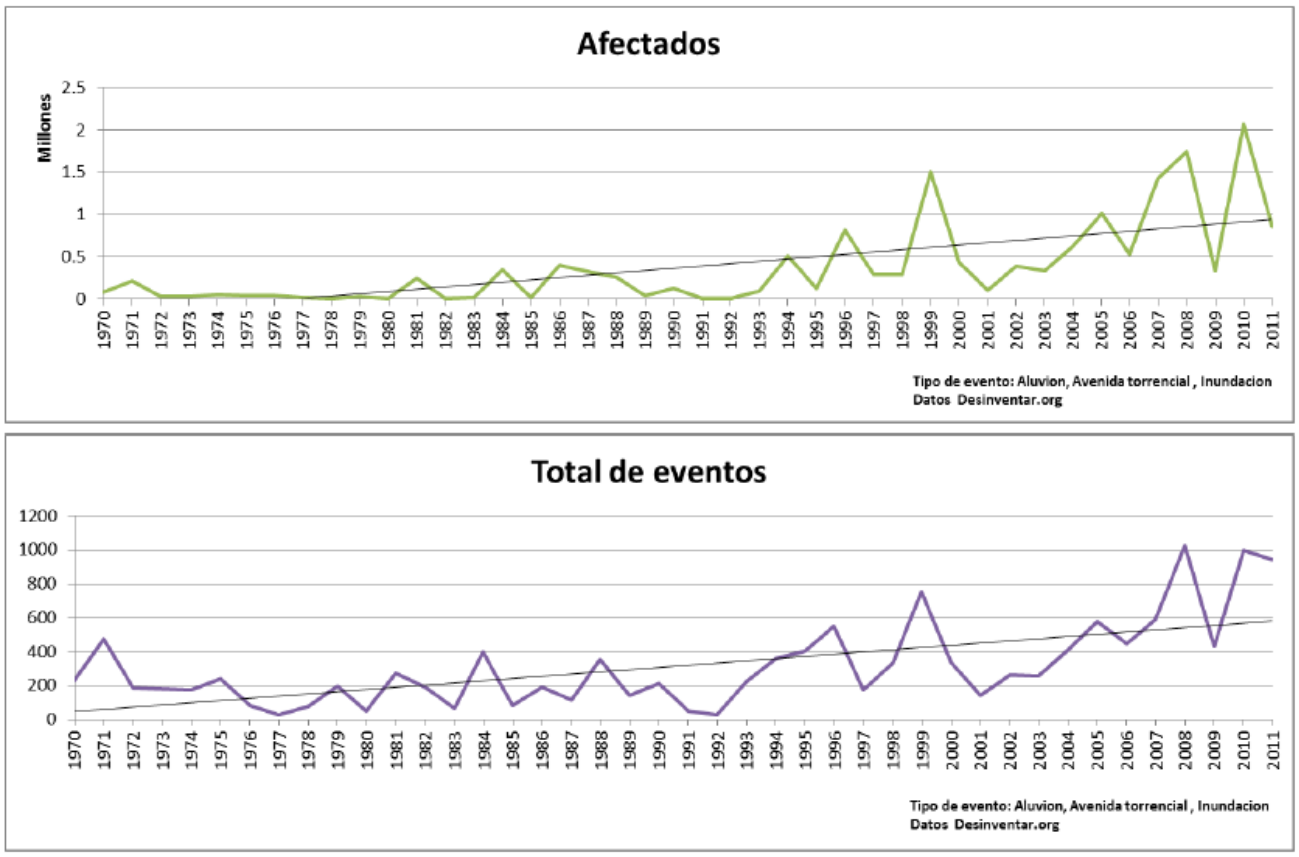


Figura 2-10. Evolución de los eventos reportados de inundación y personas afectadas en Colombia a partir de 1970 (Fuente [35]; desinventar.org)

La curva de eventos de inundación muestra picos en 1971, 1984, 1988, 1999, 2008 y 2010 que coinciden con el fenómeno La Niña. Esta información establece la relación entre la variabilidad climática y la probabilidad de ocurrencia de desastres por inundaciones, y muestra la necesidad incluir la gestión integrada del riesgo en este tema dentro de los planes de desarrollo territorial [35].

De la misma forma, se ha observado que los periodos críticos de inundación corresponden con el régimen bimodal de lluvias que afecta a la mayoría del país, con picos en los meses abril-mayo y octubre-noviembre sobre las curvas de total de eventos y personas afectadas. El tercer pico de afectación, aunque más pequeño en magnitud, se presenta en el mes de julio, debido posiblemente a la suma de efecto del fenómeno de La Niña y la temporada de ciclones tropicales en la costa Caribe [35].

Es importante destacar el evento de fenómeno de la Niña de 1998-2000 en el cual se vieron afectados 24 departamentos, hubo 155 fallecidos, 1.57 millones de afectados y pérdidas económicas estimadas por 33.2 billones de pesos. Igualmente, el fenómeno de la Niña de 2007-2008 el cual dejó 27 de 32 departamentos afectados, 225 muertes, 1.5 millones de personas damnificadas, y pérdidas económicas de hasta 38.5 billones de pesos. La ciudad de Cali experimentó un incremento en las emergencias sanitarias y un colapso de su sistema de drenaje urbano [35]. Este evento de la Niña generó 1.569 registros de emergencia, de los cuales el 90% se debió a fenómenos hidrometeorológicos: inundaciones 58%, deslizamientos 20% y vendavales 12%. El año 2008 fue calificado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y los Ministerios Colombianos como

el de mayor población afectada en el último decenio lo cual generó a su vez un gran impacto económico [36].

Por último en los años 2010-2011 se presentaron continuas e intensas lluvias que ocasionaron deslizamientos e inundaciones en 28 de los 32 departamentos de Colombia. Más de 3 millones de personas (7% de la población total del país) fueron damnificadas y probablemente se trató del peor desastre causado por un evento natural en la historia del país. Las inundaciones de este periodo redujeron el PIB nacional del año 2011 en un 2% [29]. La irregular geografía de Colombia, el fenómeno de la Nina, aumentos de entre cinco y seis veces de la precipitación normal en algunas regiones de Colombia, entre otros factores de manejo urbano que a continuación se van a describir, fueron las principales causas de esta catástrofe.

Franco, 2010 y Sedano, et al., 2012 indican que las inundaciones urbanas en Colombia se deben principalmente a 4 factores: 1) cambio climático y variabilidad climática, pues se han aumentado considerablemente las precipitaciones en el País y se han tenido fenómenos de gran trascendencia como el de la Niña. 2) Crecimiento demográfico junto con urbanización no planificada, pues esto hace que la infraestructura de alcantarillado y drenaje urbano se encuentre en déficit, no sea suficiente o simplemente no exista para algunas comunidades. 3) Mal uso del suelo, pues muchos centros y expansiones urbanas son construidas en lugares bajo amenaza inminente de inundación. 4) Ineficiencia de la infraestructura de drenaje urbano existente que involucra malos diseños, visiones poco innovadoras y medidas poco eficientes. Por otra parte, Jha, et al., 2012 indican que las recientes inundaciones en Colombia son el resultado de las actividades humanas para incrementar su riesgo como una combinación entre deforestación, destrucción de humedales y un inadecuado desarrollo urbano y de infraestructura mal diseñada/enfocada.

2.3.3.1. Caso Barranquilla

El sistema hidrológico de Barranquilla forma parte de la cuenca baja de río Magdalena, del cual extrae un caudal medio de 6.5 m^3/s para su abastecimiento generando un consumo aproximado de 4 m^3/s. La cobertura de acueducto es del 99% y la de alcantarillado del 95%, pero actualmente no existe un alcantarillado pluvial formal lo cual genera el grave problema de los arroyos que se forman en épocas de lluvia y que afectan a miles de personas y a la economía de la región. Por otra parte, las áreas permeables producto del desarrollo urbano son prácticamente inexistentes lo cual agrava el problema al incrementar el caudal y el tiempo de respuesta de los arroyos ante un evento fuerte de lluvia [37].

Barranquilla es una ciudad que no fue concebida pensando en el alcantarillado pluvial y por tal razón hoy en día sufre los daños que ocasionan las inundaciones y los famosos arroyos que paralizan actividades industriales, comerciales, educativas, sin mencionar la salud pública y los índices de accidentalidad que ya han cobrado muchas víctimas y generado daños materiales de gran magnitud. El impacto producido por esta problemática se puede dividir en tres aspectos: 1) sectores de alta pendiente que debido al tipo de suelo y a la falta de drenaje pluvial se han convertido en zonas de alto riesgo a deslizamientos. 2) Sectores directamente afectados por los caudales, velocidades de los arroyos y los materiales que arrastran, es decir, las calles por los cuales transitan los arroyos. 3) Las zonas bajas a las cuales llegan los arroyos y en las cuales predominan las inundaciones [37].

La ciudad de Barranquilla se encuentra localizada sobre una suave colina que divide la ciudad en la zona oriente y occidente, y que de esta forma genera dos vertientes de drenaje que tienen direcciones opuestas. La vertiente oriental es la de mayor extensión y drena el agua en el sentido occidente-oriente hacia la franja del rio Magdalena, zona bastante baja y plana y hacia donde llega el agua del 70% del sector urbano de la ciudad. La vertiente occidental drena el agua en el sentido oriente-occidente hacia el Arroyo León, el cual desemboca finalmente en la franja costera del mar Caribe[2]. En la Figura 2-11 se pueden apreciar claramente los dos esquemas de drenaje de la ciudad de Barranquilla.

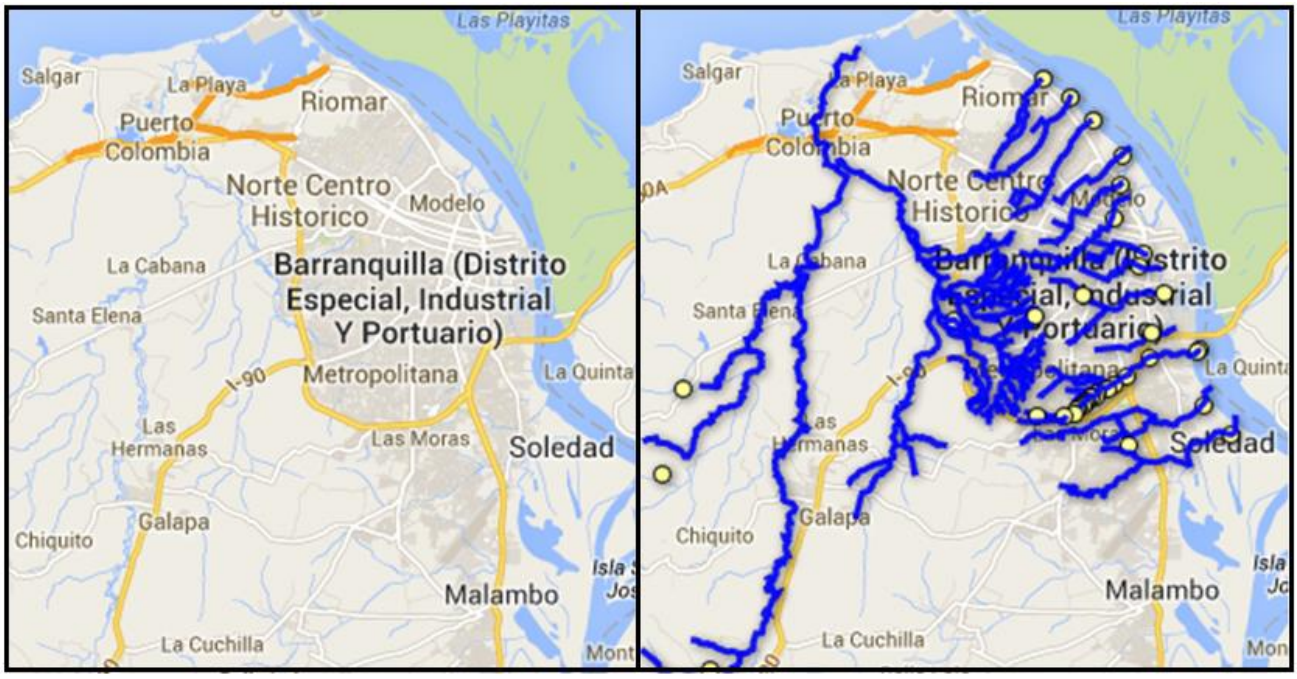


Figura 2-11. Esquema del drenaje de la ciudad de Barranquilla 2013 (Fuente: Google Maps y proyecto Arroyos de Barranquilla (http://www.arroyosdebarranquilla.co))

Desde sus inicios, la ciudad de Barranquilla empezó a desarrollarse en la parte baja, es decir junto al río Magdalena. En ese entonces, hacia aguas arriba de las cuencas de drenaje, existían cauces naturales y los suelos eran prácticamente en su totalidad permeables, condición que controlaba la escorrentía generada por los eventos de precipitación y por consiguiente los impactos en la población. El proceso de urbanización de la ciudad continuó disminuyendo la capacidad de infiltración de los suelos al incrementarse las superficies impermeables (el suelo de la cuenca oriental está urbanizada en más del 90%), lo cual originó modificaciones en los cauces naturales y se desarrolló un drenaje conformado por calles-canales [38]. Lo anterior causó un incremento en los volúmenes de escorrentía, menores tiempos de respuesta y patrones hidráulicos observándose un comportamiento torrencial a través de la red de drenaje de la ciudad, es decir en las vías de Barranquilla.

[2] Información extraída del proyecto: Arroyos de Barranquilla. Disponible en línea en: http://www.arroyosdebarranquilla.co

Por otro lado, las pendientes de las vías son hidráulicamente empinadas en la mayor parte del casco urbano. Sólo existen pendientes bajas en las zonas cercanas al río Magdalena (zonas muy planas) y en el extremo de la cuenca occidental. Las vías orientales de barranquilla tienen pendientes que varían entre el 2 y 5% a lo largo de su recorrido, mientras que las occidentales pueden superar el 5% en las partes altas de la cuenca. Las pendientes altas generan velocidades inexorablemente altas y tiempos de concentración muy cortos lo cual tiene como resultado caudales muy peligrosos en los arroyos y condiciones de amenaza por inundación en las zonas bajas [39]. Los arroyos de Barranquilla pueden tener caudales de hasta 100 m³/s y velocidades de hasta 9 m/s que paralizan la movilidad de la ciudad y generan situaciones de riesgo para la población. Esta problemática de drenaje pluvial es considerada como una de las más críticas en zonas urbanas a nivel mundial, pues genera importantes impactos: inundaciones, daños en la infraestructura urbana, daños en redes de servicios, daños ambientales, parálisis en la actividad comercial, industrial y en el transporte urbano, deterioro en la salud pública y accidentes con pérdida de vidas humanas [40].

Los suelos de la ciudad de Barranquilla están conformados en mayor parte por calizas y arcillas caracterizadas por unas buenas condiciones de drenaje que inducen altos aportes de escorrentía superficial. La precipitación promedio anual en la ciudad de Barranquilla es de 850 mm aproximadamente, basada en los registros de la estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) del aeropuerto Ernesto Cortissoz. En general se presentan dos temporadas de lluvias, la primera en los meses de Mayo-Junio y la segunda en los meses de Septiembre-Octubre que corresponden a los meses más lluviosos del año (caen 420 mm de los 850 mm al año). Se ha observado que la duración de las lluvias es menor a 80 minutos y en promedio se presentan del orden de 60 días con lluvia por año. Aun así, solo 20 eventos de precipitación al año son significativos (mayor al umbral de 20 mm) en cuanto a la generación de escorrentía con registros máximos del orden de 130 mm y con un patrón en cuanto a la hora de iniciación de los eventos que varía entre las 10:00 AM y las 4:00 PM [37, 39].

En cuanto a la problemática de drenaje de Barranquilla, se han realizado diversos estudios hidrológicos identificando 20 arroyos de importancia que generan mayores impactos y en los cuales se han desarrollado obras e intervenciones de mitigación: Las Malvinas, Santa María, Don Juan, Don Diego, Afán, Villa San Pedro, y arroyos de los barrios Por Fin, San Luis, Lipaya, Parque Santa María y Ciudad Modesto, entre otros. Los caudales estimados para los arroyos de la vertiente oriental, para periodos de retorno de 10 años, presentan caudales entre 6 y 108 m³/s para áreas de drenaje entre 40 y 768 Ha [37, 38]

En su estudio, (Ávila, 2012) estimó las caudales y las velocidades de los arroyos de algunas cuencas principales de la vertiente oriental. Detalles de cómo estimó dichos parámetros se encuentran en su estudio. Básicamente, Ávila determinó las cuencas más significativos de la vertiente oriental tienen un área promedio de 370.5 Ha y que generan caudales promedio de 56.2, 79.3 y 103.6 m³/s para eventos de precipitación con periodos de retorno de 5, 25 y 100 años respectivamente. Igualmente, estimó velocidades promedio de 6.37, 7.21 y 7.95 m/s para eventos de precipitación con periodos de retorno de 5, 25 y 100 años respectivamente. Los resultados anteriores permiten inferir que las magnitudes de caudales y velocidades reflejan la peligrosidad de los arroyos asociada con condiciones hidráulicas supercríticas. De los arroyos con mayor peligrosidad se encuentra el del Siape (calle 84), Country (calle 76), Rebolo (Carrera 21), Felicidad y Don Juan.

Recientemente se han realizado diversos estudios que buscan dar respuesta y plantear posibles soluciones a este caso [39, 40], y prácticamente en todos se ha llegado a la misma conclusión. Para zonas urbanas consolidadas como Barranquilla, el enfoque mediante el cual se logran atenuar los efectos producidos por las lluvias son: restitución de las condiciones hidrológicas urbanas de las cuencas, canalización progresiva de arroyos y control de la contaminación de la escorrentía pluvial. Restablecer las condiciones hidrológicas de las cuencas urbanas es quizá el más importante aspecto a desarrollar, pues lo que se busca con esto es reducir los volúmenes de escorrentía y caudales pico para un evento de lluvia. Para lograrlo, se ha recomendado el uso de tecnologías de drenaje urbano sostenible. En próximos capítulos se va a profundizar un poco más sobre estas tecnologías, y se volverán a citar los estudios de Ávila como solución a los problemas de drenaje de Barranquilla.

2.4. Filosofía Tradicional de Drenaje vs Nuevas Visiones

Debido a todo lo analizado anteriormente: mayor aumento de la población que la infraestructura de drenaje, incremento en los volúmenes de lluvia producto del cambio climático y la urbanización, y al aumento de las inundaciones en general, es necesario profundizar en los cambios que se han venido adoptando alrededor del mundo en cuanto al manejo del agua lluvia en las ciudades. A continuación se va a contrastar las visiones viejas y tradicionales de drenaje urbano contra las nuevas visiones, se van a describir las nuevas tecnologías empleadas y se van a analizar algunos estudios que cuantifican el desempeño de estas.

2.4.1. Filosofía tradicional de drenaje urbano

En el desarrollo de las infraestructuras de drenaje y saneamiento de una ciudad suelen identificarse varias fases. En primer lugar, se tendió a canalizar y controlar las aguas residuales. Posteriormente se encauzó la escorrentía generada por el agua lluvia tendiendo a minimizar el riesgo de sufrir inundaciones. Lo anterior ha dado lugar a los sistemas convencionales de saneamiento y drenaje en las ciudades, basados en colectores o redes de tuberías cuyo objetivo primordial es evacuar lo antes posible el agua lluvia hacia el cuerpo receptor. Una vez resueltos estos problemas, apareció el problema de la calidad del agua que estaba llegando a los cuerpos receptores, pues hoy en día se sabe que las aguas de lluvia están lejos de ser aguas limpias y constituyen una fuente importante de contaminación [41].

La construcción de sistemas de drenaje combinados y separados han sido el pilar durante siglos para evacuar el agua lluvia y residual de las ciudades, evitando problemas de inundación y salubridad. En principio, los sistemas de drenaje combinado eran los más empleados, en los cuales toda el agua urbana (residual y lluvia) eran recolectados y transportados a través de un sistema de tuberías y colectores y descargados en una planta de tratamiento, o de no contar con una, directamente en el cuerpo receptor. En contraposición al sistema combinado, surgió el sistema separado de drenaje, en el cual las aguas residuales y lluvias eran drenadas por separado. Este último tenía la ventaja de que el agua que entraba a la planta de tratamiento solo correspondía a la residual, es decir entraba en menor cantidad y a una tasa mucho más constante en cuanto a la calidad y cantidad. El agua lluvia, por el contrario, tenía que viajar por sistemas sobredimensionados (muy costosos) y llegaba directamente al cuerpo receptor sin ningún tipo de tratamiento, afectando así la calidad de este [42,

43]. En la Figura 2-12 a) se puede apreciar un sistema convencional combinado, y en el esquema b) se encuentra un sistema convencional separado de drenaje urbano. Nótese las diferencias entre ambos explicadas anteriormente.

En las últimas décadas, adicional al sistema separado, ciertos países desarrollados implementaron estructuras de detención dentro del mismo sistema de drenaje con el fin de reducir inundaciones y desbordamientos del sistema combinado. Lo anterior requiere de la construcción de estructuras subterráneas de almacenamiento, y en algunos casos, el uso de capacidad potencial de almacenamiento mediante sistemas de control en tiempo real. La sostenibilidad de este tipo de tecnologías ha demostrado ser muy baja, pues se incurren en costos demasiado elevados y adicionalmente no se logran los alivios y reducciones esperadas [43].

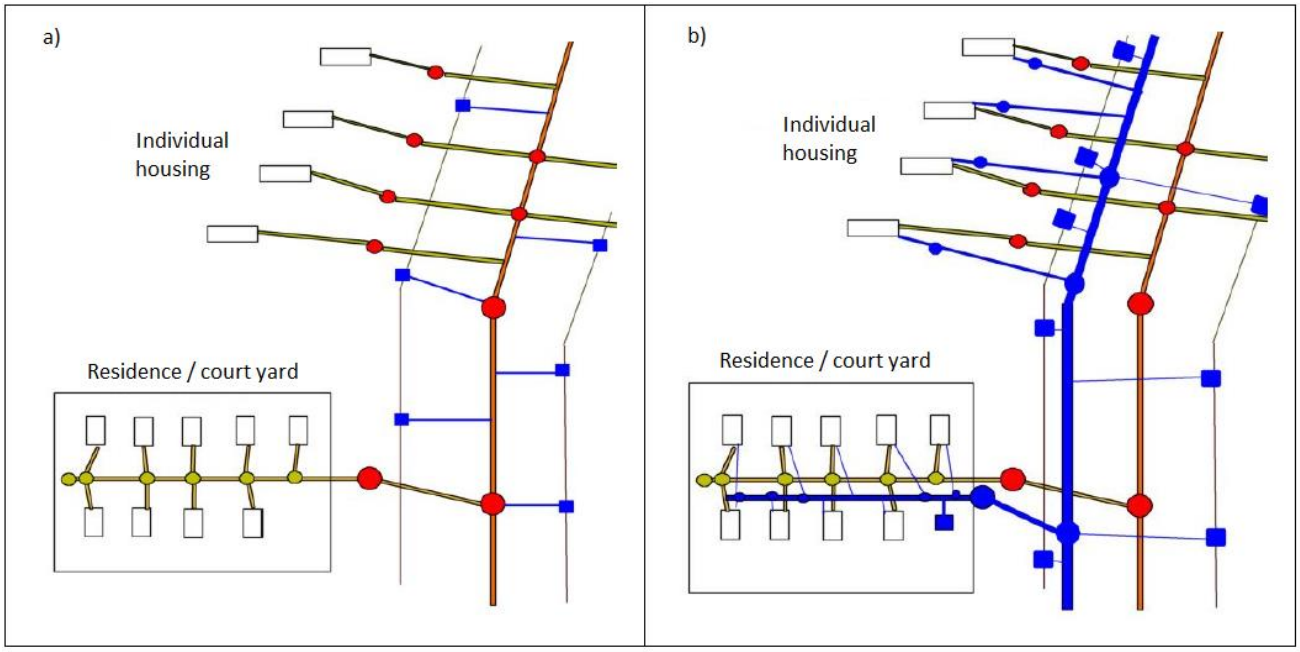


Figura 2-12. a) Sistema convencional combinado de drenaje urbano (Fuente: [42]), b) sistema convencional separado de drenaje urbano (Fuente: [42])

A medida que se lleva a cabo un mayor desarrollo urbano y se sigue con la visión tradicional de drenaje urbano discutida anteriormente, se empiezan a generar impactos negativos en los cuerpos receptores y problemas de inundaciones producto de la sobrecarga del sistema convencional de tuberías y colectores. Este impacto se incrementa aún más si se trata de países en vías de desarrollo, los cuales se ven inmersos en problemas de planificación, crecimiento acelerado de su población vs infraestructura de drenaje y aumento en los volúmenes de lluvia (ver numerales 2.1 a 2.3). Por una parte, se generan en los sistemas convencionales problemas de cantidad, cuando las tasas de urbanización superan las planificaciones iniciales, lo cual trae como consecuencia que la infraestructura quede sub dimensionada dando lugar a sobrecargas e inundaciones. Por el otro lado, se generan problemas de calidad en los cuerpos receptores, al ser estos los encargados de recibir toda la escorrentía urbana sin ningún tipo de tratamiento previo [41].

Recordando de numerales previos, el crecimiento de las zonas impermeables en las ciudades modifica los flujos naturales del ciclo hidrológico, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. La reducción de espacios vegetados reduce en primera instancia la intercepción natural

y la evapotranspiración. El aumento de la impermeabilidad causa una reducción de la infiltración, y como consecuencia de todo ello, se generan volúmenes de escorrentía netamente mayores, y además, se aceleran los tiempos de respuesta (mayor y anticipado pico de caudal) por lo que aumenta el riesgo de inundaciones.

Por todo lo mencionado anteriormente, el sistema convencional de drenaje urbano es considerado hoy en día como el resultado de la falta de planeación. El problema con este tipo de manejo, es que está comprobado que los problemas asociados con inundaciones son inminentes (sobre todo en países en vías de desarrollo), pues los volúmenes de escorrentía y el pico de caudal se han incrementado demasiado ante los eventos de lluvia. Por otra parte, las medidas estructurales, como los tanques de almacenamiento centralizados, constituyen en prácticas muy poco costo-efectivas y no están solucionando el problema de sobrecarga. Adicionalmente, se ha comprobado que el transporte directo de cargas contaminantes y material particulado que lleva consigo la escorrentía urbana, ha causado que los cuerpos receptores (ríos) se sedimenten más de la cuenta causando desbordamientos y problemas de cantidad aguas abajo [44]. Es por todo lo anterior, que la visión tradicional del drenaje urbano en las ciudades mediante sistemas convencionales de tuberías, colectores y tanques de almacenamiento centralizado, se ha cuestionado profundamente, hasta el punto de necesitar otro tipo de enfoque que solucione los problemas de cantidad y calidad del agua lluvia en las cuencas urbanas.

2.4.2. Visión alternativa de drenaje urbano

La necesidad de afrontar la gestión de las aguas pluviales desde una perspectiva diferente a la convencional, que combine aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales, está llevando a un rápido aumento a nivel mundial del uso de prácticas de manejo en la fuente (SMPs por Source Management Practices) [41]. El empleo de este tipo de prácticas para el control de la lluvia, pretende reducir la escorrentía y los contaminantes de exceso que ingresan dentro de los sistemas de drenaje convencionales. La ventaja es que usualmente, este tipo de alternativas resultan mucho más efectivas en el manejo de la escorrentía, y mucho más costo-efectivas en cuanto a aspectos de construcción y mantenimiento que los sistemas convencionales de drenaje urbano. Aun así, y a pesar de que la anterior afirmación en la mayoría de los casos resulta cierta, es necesario hacer un estudio de costo efectividad que permita tomar la mejor decisión en cuanto a la implementación de una alternativa de drenaje [43].

En la Figura 2-13 a) se puede apreciar un esquema de un sistema alternativo de drenaje urbano mediante prácticas de manejo en la fuente. Nótese que se trata de un sistema separado, en el cual el agua residual es drenada aparte del agua lluvia. A diferencia del sistema convencional separado analizado en la Figura 2-12 b), en este sistema alternativo el agua lluvia puede ser tanto infiltrada en el suelo existente, o retenida por un tiempo mediante detención para luego ser soltada al sistema de drenaje convencional. La idea fundamental de la visión del "manejo en la fuente", es controlar el agua en el sitio en donde cae y tan pronto como sea posible mediante detención y/o infiltración [42]. Hablar de atenuación o detención en la fuente, hace referencia a almacenar temporalmente la escorrentía generada en un evento de lluvia en un lugar muy cercano al sitio en el cual cayó, para luego ser devuelta al sistema de drenaje existente una vez el pico crítico de lluvia haya pasado. De esta forma, se reducen los volúmenes de escorrentía, se retrasa el pico de caudal, se aproxima en cierta medida a las condiciones de drenaje pre urbanización, y se mitiga el problema de inundaciones

aguas abajo. De igual forma, al almacenar el agua lluvia, se puede incurrir en prácticas como la reutilización de la misma para suplir ciertas necesidades (irrigación de jardines, lavado de autos, consumo interno, etc.). Hablar de infiltración, hace referencia a reducir la escorrentía que llega a un sistema de drenaje convencional, al facilitar la infiltración de la misma a través del suelo para recargar el nivel de las aguas subterráneas. Mediante esta práctica, de alguna forma se está intentando devolver las condiciones pre urbanización a una cuenca urbanizada, al aumentar las tasas de infiltración producto de tener mayores superficies permeables.

Según [44], la visión alternativa del drenaje urbano hace referencia a "manejar el agua lluvia tan pronto como caiga", pues el volumen inicial del agua, la velocidad de la misma, y la capacidad para transportar sedimentos por parte del agua es relativamente bajo. Debido a la baja velocidad del agua, los sedimentos y material particulado pueden ser fácilmente separados y de esta forma se evita que ingresen dentro del sistema de drenaje. Por la misma razón, la erosión resultaría mucho menor, lo que traería como consecuencia lo mismo: menos contaminantes y sedimentos alcanzando el cuerpo receptor. Según el enfoque holandés, existen 3 pilares básicos en cuanto al manejo actual del agua urbana según su experiencia: 1) el espacio que ya ha sido concedido para el sistema convencional es crucial para el drenaje de la ciudad y debe ser mantenido como tal. 2) Se deben aplicar siempre tres estrategias de manejo del agua lluvia (retener, almacenar y drenar) las cuales corresponden a retener lo máximo posible el agua lluvia en el sitio en el cual cayó. 3) Cualquier influencia adversa al sistema de drenaje convencional debe ser compensada.

La combinación y el trabajo conjunto entre ambos tipos de visiones (centralizada vs manejo en la fuente) también puede ser posible y trae consigo grandes beneficios para el manejo del agua urbana. En la Figura 2-13 b) se encuentra un esquema alternativo de drenaje urbano con manejo en la fuente, combinado a uno con sistema centralizado de almacenamiento. De esta forma, se consiguen los beneficios de reducción de escorrentía y picos de caudal mediante la detención/infiltración en la fuente, además de los que puede proveer un almacenamiento centralizado (a gran escala) existente para el manejo de las inundaciones y agua de exceso.

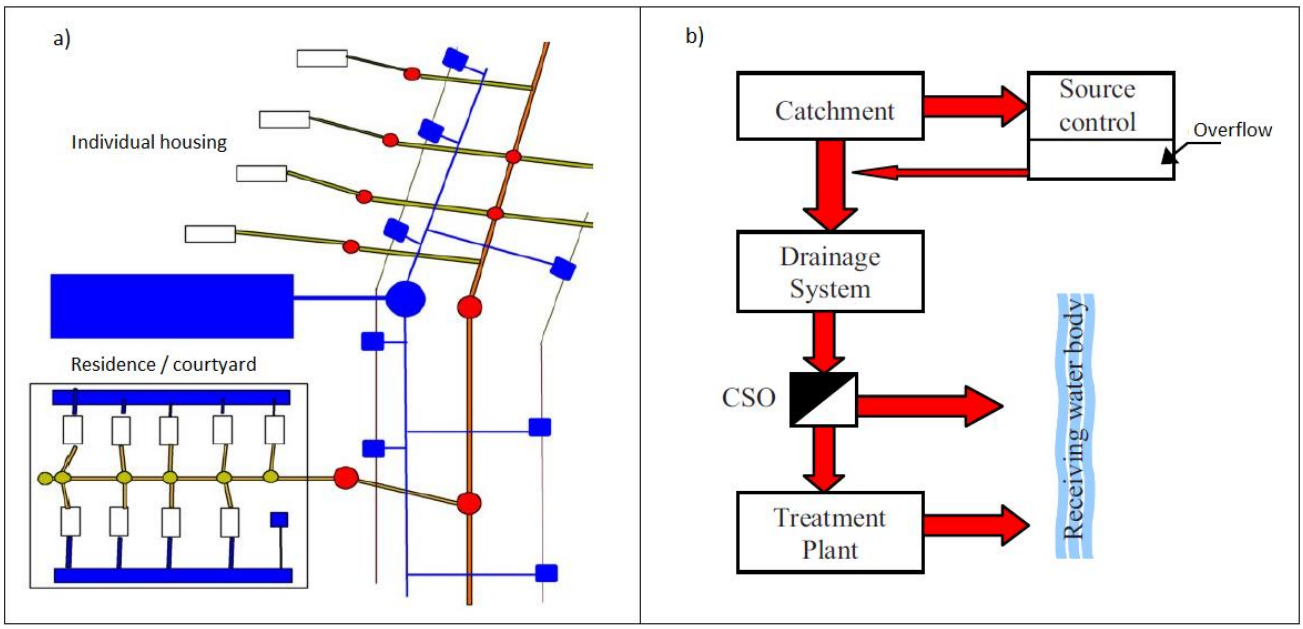


Figura 2-13. a) Sistema alternativo de drenaje urbano – manejo en la fuente (Fuente: [42]), b) sistema alternativo de drenaje urbano - manejo en la fuente, combinado con sistema centralizado de almacenamiento (Fuente: [45])

Las medidas de control en la fuente pueden ser de tipo estructural y no estructural. Las medidas no estructurales hace referencia a facilidades alternativas colocadas en pavimentos o edificaciones que ayudan a minimizar las superficies impermeables y maximizando la infiltración o el aprovechamiento de las superficies permeables. Las medidas estructurales corresponden a aquellas construcciones cercanas a la fuente que permiten la retención/almacenamiento del agua lluvia (tales como tanques, techos verdes, etc.). Existen numerosas evidencias de que las medidas de control en la fuente han resultado efectivas para las reducciones de los impactos generados por la escorrentía urbana. Aun así [43], han expuesto tres posibles riesgos que podrían presentar las medidas de control en la fuente (medidas descentralizadas) si se implementan masiva y separadamente de los sistemas convencionales de drenaje: 1) el conocimiento limitado acerca de sus posibles desventajas a largo plazo, 2) la tentación que representan estas tecnologías para ser usadas por las autoridades locales como forma económica de manejar el agua urbana, sin seguir invirtiendo en los sistemas convencionales que también son necesarios, y 3) las dificultades de mantenimiento y costos que resultarían al tener un sistema descentralizado (en la fuente) funcionando junto con un sistema centralizado (convencional).

En la siguiente tabla, se resumen las principales ventajas, desventajas, similitudes y diferencias entre los sistemas convencionales (tuberías y colectores – almacenamiento centralizado) y los sistemas alternativos de drenaje urbano (control en la fuente – almacenamiento descentralizado).

Tabla 2-6. Principales ventajas, desventajas, similitudes y diferencias entre los sistemas convencionales y los sistemas alternativos de drenaje urbano (Adaptada de: [41])

	Sistema convencional (tuberías y colectores)	**Sistema alternativo (control en la fuente)**
Coste de construcción	Pueden ser equivalente, aunque los usos indirectos de las medidas de control en la fuente reducen su costo real	
Costos de operación y mantenimiento	Establecido	Falta experiencia
Control de inundaciones en la propia cuenca	Si	Si
Control de inundaciones aguas abajo	No	Si
Reutilización	No	Si
Recarga / infiltración	No	Si
Eliminación de contaminantes	Baja	Alta
Beneficios en servicios al ciudadano	No	Si
Beneficios educacionales	No	Si
Vida útil	Establecida	Falta experiencia
Requerimientos de espacio	Insignificantes	Pueden ser muy significantes
Criterios de diseño	Establecidos	Falta experiencia

A continuación, se van a analizar más detalladamente las prácticas de manejo en la fuente (SMPs), sus diferentes tipos, características y desempeño/eficiencia en cuanto a la reducción de volúmenes de escorrentía y cargas contaminantes que llegan a los sistemas convencionales de drenaje urbano.

2.4.3. Prácticas de manejo en la fuente (SMPs)

Las prácticas de manejo sostenible en la fuente (SMPs) corresponden a los sistemas alternativos de drenaje urbano. Dentro de estos existen un gran número de tecnologías direccionadas a intentar reestablecer las condiciones hidrológicas pre urbanización mediante la detención/almacenamiento temporal y/o infiltración de la escorrentía. Los SMPs se pueden dividir en dos grandes grupos: 1) los denominados SUDs (Sustainable Urban Drainage Systems) o BMP (Best Management Practices), y 2) los denominados LIDs (Low Impact Developments). A continuación se van a presentar las características principales de cada uno de estos y las tecnologías que los componen. No es propósito de este documento detallar cada una de las prácticas de manejo sostenible, razón por la cual no se va a profundizar mucho en este numeral. Existen diversos estudios y bibliografía suficiente si se desea obtener información adicional de este tipo de sistemas.

Los SUDs (en el Reino Unido) o BMPs (en Estados Unidos) son en esencia lo mismo. Surgieron como medidas alternativas para reestablecer el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización e intervención humana [46]. El objetivo principal de estas prácticas es minimizar lo máximo posible los impactos del desarrollo urbanístico en cuanto a la calidad y la cantidad de la escorrentía (en origen, durante su transporte y destino), así como maximizar la integración paisajística y el valor social y ambiental de las ciudades [41]. Se podría decir que tanto los SUDs como los BMPs, tienden a ser caracterizados a una escala desde lo netamente predial hasta lo local e inclusive regional. Es decir que estas prácticas encierran un gran número de tecnologías que si bien pueden ser empleadas en micro escala (por el dueño de un predio para mitigar y mejorar localmente la escorrentía urbana), pueden alcanzar una macro escala (nivel regional/ciudad), las cuales serían operadas por las entidades administrativas correspondientes y serían empleadas para mitigar y mejorar regionalmente la escorrentía urbana.

Los LIDs corresponden a tecnologías en sitio direccionadas a mantener o reestablecer el régimen hidrológico antecedente al fenómeno de urbanización [47, 48]. Es decir, que básicamente tanto LIDs como SUDs y BMPs surgen bajo la misma necesidad y tienen el mismo objetivo en común. La diferencia radica, en que las tecnologías LIDs tienden a ser caracterizados solamente a una escala predial (micro escala), es decir empleados para mitigar y mejorar localmente la escorrentía urbana.

Las tres denominaciones anteriores incluyen tecnologías que buscan la reducción en volúmenes y contaminantes de escorrentía mediante el almacenamiento y la infiltración de la misma. Los mecanismos de infiltración corresponden a la reducción de la escorrentía que llega a un sistema de drenaje convencional, al facilitar la infiltración de la misma a través del suelo para recargar el nivel de las aguas subterráneas. Mediante esta práctica, de alguna forma se está intentando devolver las condiciones pre urbanización a una cuenca urbanizada, al aumentar las tasas de infiltración producto de tener mayores superficies permeables. Los mecanismos de almacenamiento representan un gran número de prácticas para el manejo del agua lluvia y tienen como objetivo almacenar temporalmente la escorrentía generada en un evento de lluvia en un lugar muy cercano al sitio en el cual cayó, para luego ser devuelta al sistema de drenaje existente una vez el pico crítico de lluvia haya pasado. De esta forma, se reducen los volúmenes de escorrentía, se retrasa el pico de caudal, se aproxima en cierta medida a las condiciones de drenaje pre urbanización, y se mitiga el problema de inundaciones aguas abajo. De igual forma, al almacenar el agua lluvia, se puede incurrir en prácticas como la reutilización de la misma para suplir ciertas necesidades (irrigación de jardines, lavado de autos, consumo interno, etc.). Los mecanismos de almacenamiento se pueden dividir en 2 distintos tipos de manejo, la detención y la retención.

Detención hace referencia a que toda o parte de la escorrentía captada es temporalmente almacenada para luego ser devuelta gradualmente al sistema de drenaje. Esta aproximación no permite el aprovechamiento del agua lluvia almacenada. La retención corresponde a que toda o parte de la escorrentía captada por un largo periodo de tiempo y no es devuelta al sistema de drenaje o al cuerpo receptor. El agua almacenada es entonces empleada para infiltración, evaporación o actividades de reutilización tales como el lavado de autos, consumo humano y/o irrigación de jardines [45].

En general, los objetivos primordiales de los SMPs se pueden resumir a continuación:

- Proveer una alternativa sostenible para la protección ambiental de los cuerpos receptores al mejorar el ciclo hidrológico en contextos urbanos.

- Introducir nuevos conceptos, tecnologías e ideologías para el manejo del agua urbana, e intentar reestablecer las condiciones pre urbanización al reducir volúmenes de escorrentía y picos de caudal e incrementar zonas permeables.

- Reducir los costos de construcción, mantenimiento y operación de la infraestructura dedicada al drenaje urbano.

- Contrastar en cuanto a aspectos económicos, ambientales y técnicos a los sistemas convencionales de drenaje urbano compuestos por tuberías y colectores. Ofrecer una alternativa nueva y mejor hacia el drenaje de las ciudades.

- Establecer políticas y regulaciones que permitan una educación ciudadana sostenible frente al manejo del agua. Igualmente proveer incentivos económicos para desarrollar conciencia y desarrollo ambiental.

Generalmente, los SMPs corresponden a medidas estructurales que gestionan la escorrentía mediante actuaciones que contienen en mayor o menor grado algún elemento constructivo o supongan la adopción de criterios urbanísticos. Las medidas estructurales, o las tecnologías más utilizadas son las siguientes continuación [41, 46, 47, 48]:

- Humedales artificiales (*constructed wetlands*): Son lagunas artificiales que permanecen permanentemente con agua de muy baja profundidad. Tienen una gran densidad de vegetación emergente y aportan un gran potencial ecológico. Los humedales artificiales manejan la escorrentía urbana a través de almacenamiento, infiltración en cuanto a cantidad, y mediante sedimentación y acción biológica en cuanto a la cantidad.

- Estanques de retención (*retention ponds*): Son estanques artificiales que permanecen con una lámina de agua constante. Difieren de los humedales artificiales en el sentido de que éstos tienen una mayor profundidad y vegetación perimetral y no completa. Al igual que los humedales, los estanques de retención manejan la escorrentía urbana a través de almacenamiento, infiltración en cuanto a cantidad, y mediante sedimentación y acción biológica en cuanto a la cantidad (ver Figura 2-14 a).

- Depósitos de detención (*detention basins*): Son depresiones vegetadas que permanecen secas a excepción del momento justo cuando ocurre un evento de lluvia e inmediatamente después de éste. Durante la lluvia, la escorrentía superficial es canalizada a través del depósito de detención seco hasta una salida diseñada para detenerla por un tiempo mínimo (48 horas). Son empleadas para reducir los caudales de escorrentía máximos asociados con las condiciones de urbanización y normalmente no proveen suficiente tiempo de residencia para una remoción efectiva de contaminantes.

- Depósitos de infiltración (*infiltration basins*): Son depresiones vegetadas del terreno diseñadas para almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía generada en superficies

circundantes. Mediante estas estructuras se promueve la recarga subterránea, consiguiendo adicionalmente la eliminación de contaminantes mediante filtración natural del terreno, adsorción y transformaciones biológicas.

- Cunetas verdes (*vegetated swales*): Corresponde a un canal superficial amplio con una densa capa superficial cubriendo sus lados y fondo. Pueden ser de tipo natural o artificial y están diseñados para atrapar contaminantes provenientes de la escorrentía urbana (sólidos suspendidos y metales), promover la infiltración y reducir la velocidad del agua después de un evento de lluvia. Las cunetas verdes pueden reemplazar los sedimentadores, separadores y demás estructuras de pre tratamiento existentes en los sistemas convencionales de drenaje, pero están limitados en la cantidad de escorrentía que pueden tratar eficientemente (ver Figura 2-14 b).

- Drenes filtrantes (*filter drains*): Son a zanjas poco profundas rellenas de materiales filtrantes (de tipo granular o sintético), concebidas para captar y filtrar la escorrentía de superficies impermeables contiguas con el fin de transportarlas hacia aguas abajo. Pueden o no contener un conducto inferior de transporte. Adicionalmente, permiten la infiltración y laminación de los volúmenes de escorrentía.

- Pozos y zanjas de infiltración (*soakaways and infiltration trenches*): Corresponden a excavaciones superficiales que son rellenadas con piedras o escombros para crear un almacenamiento subsuperficial temporal para la infiltración de la escorrentía superficial. La escorrentía gradualmente se infiltra a través del fondo o los lados de la zanja, llegando así hasta el subsuelo y eventualmente hasta llegar al nivel freático.

- Franjas Filtrantes (*filter strips*): Son franjas de vegetadas de suelo, muy anchas y con poca pendiente. Se localizan entre una superficie dura y el ente receptor de la escorrentía (río, curso de agua, planta de tratamiento, etc.). Propicia la sedimentación de las partículas sólidas y contaminantes embebidos en el agua urbana. Igualmente, permiten la infiltración y ayudan a reducir volúmenes de escorrentía.

- Superficies permeables (*porous/permeable paving*): Las superficies y pavimentos permeables son sistemas compuestos por una superficie resistente a la carga y una estructura compuesta de capas que permite un previo almacenamiento temporal de la escorrentía antes de ser infiltrada o drenada mediante un mecanismo de salida. Son empleados generalmente en parqueaderos o en sitios con poca carga vehicular. La superficie puede ser totalmente porosa de tal forma que el agua se infiltre a lo largo de la misma (concreto y pavimentos porosos), o puede ser construida mediante bloques impermeables separados y a través de los cuales el agua puede drenar o infiltrarse (ver Figura 2-14 c).

- Sistemas de retención/almacenamiento (*rainwater harvesting/retention systems*): Son tecnologías empleadas para recolectar, transportar y almacenar el agua lluvia de los techos o de las superficies impermeables para una gran cantidad de propósitos incluyendo la irrigación, reutilización y consumo humano, recarga de acuíferos y reducción de los volúmenes de escorrentía. Corresponden a barriles de lluvia, tanques y/o cisternas y sistemas modulares de retención/infiltración.

- Cubiertas verdes (*green roofs*): Son sistemas de cubierta vegetal multicapa que recubren terrazas, techos y tejados de todo tipo. Están diseñadas para interceptar y retener el agua lluvia justo en el momento en que cae, reduciendo así el volumen e escorrentía generada y atenuando el caudal pico. De igual forma, retienen contaminantes, actúan como capa de aislante térmico en el establecimiento y ayudan a compensar el efecto de la "isla de calor" que se producen en las grandes ciudades (ver Figura 2-14 d).

- Bio retención/jardines de lluvia (*bioretention/rain gardens*): La bio retención funciona como un mecanismo de filtración a través de plantas y tierra encargada de remover contaminantes mediante una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos. Sus elementos principales son: capa de arena, área de estancamiento, capa orgánica, capa de tierra y superficie vegetativa (plantas). La escorrentía es distribuida equitativamente hacia el área de estancamiento. La infiltración a través de las capas ocurre en un periodo de días pero es muy efectivo para la remoción de contaminantes y sólidos suspendidos.

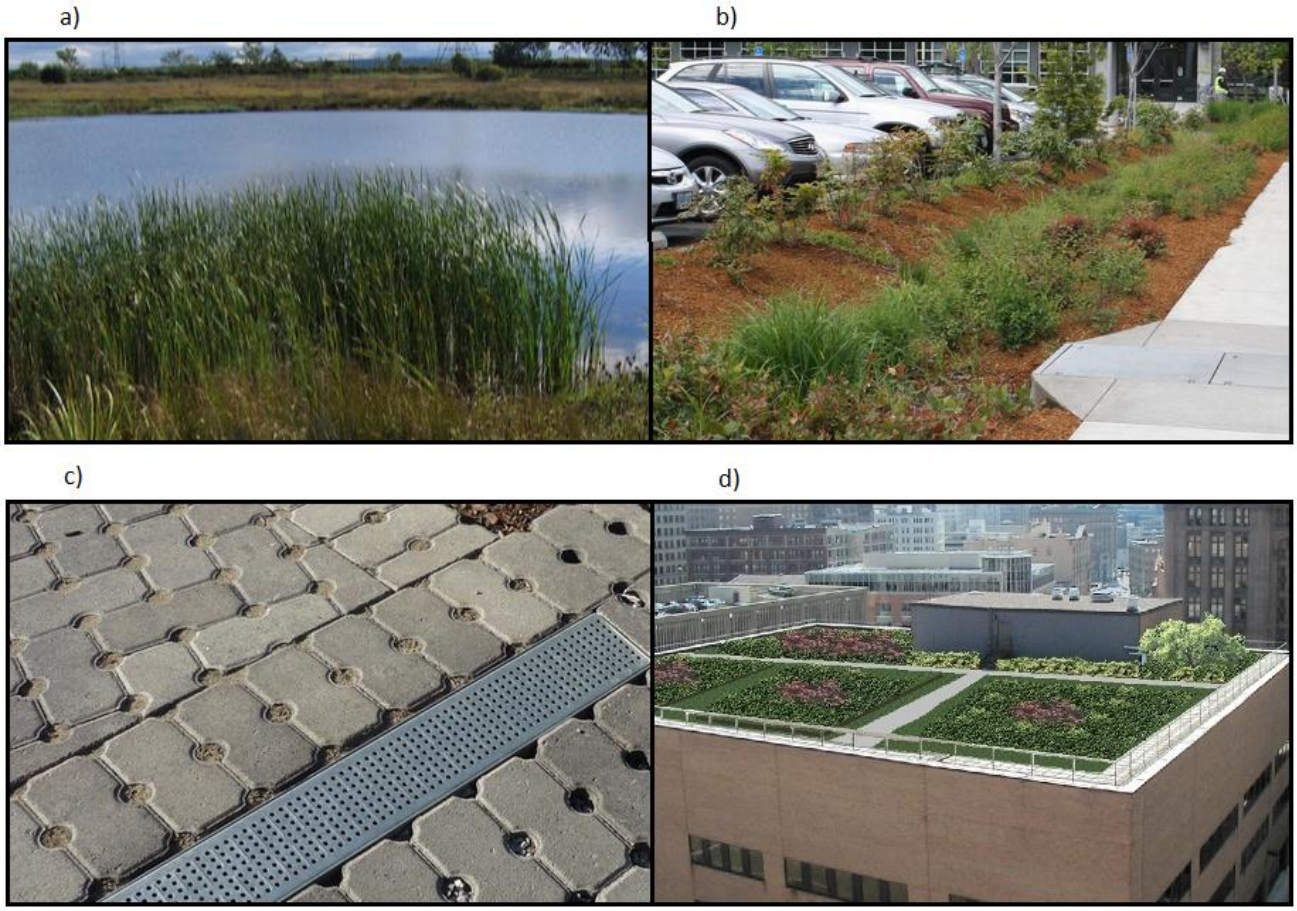


Figura 2-14. Ejemplos de distintos tipos de SMPs. a) Estanque de retención (*retention pond*)[3], b) cuneta verde (*vegetated swale*)[4], c) superficie permeable (*porous/permeable paving*)[5] y d) cubierta verde (*green roof*)[6]

[3] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/retention_and_detention/retention_ponds.html. Consultada el 18 de diciembre del 2013.

[4] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://landperspectives.wordpress.com/2011/06/02/rivereast-center-a-sustainable-site/. Consultada el 18 de diciembre del 2013.

Existen diversos estudios [45, 49, 50]que han intentado evaluar la eficiencia y desempeño de estas prácticas de manejo en la fuente (SMP) en cuanto a su potencial de reducción de volúmenes de escorrentía, pico de caudal y contaminantes. Si se requiere profundizar en los resultados obtenidos, es recomendable revisar las fuentes citadas en este párrafo.

En la siguiente tabla se encuentran resumidas las características principales de las tecnologías SMP en cuanto a control de caudal pico, reducción de volúmenes, control de contaminantes y conservación de la escorrentía mencionadas anteriormente. Es importante mencionar que el orden en el cual se encuentran listadas va desde las tecnologías empleadas a gran escala (escala regional/ciudad) hasta aquellas empleadas en micro escala (escala predio).

Tabla 2-7. Resumen de las características principales de las tecnologías SMP en cuanto a control de caudal pico, reducción de volúmenes, control de contaminantes y conservación de la escorrentía (Adaptada de: [47, 51])

Práctica/tecnología SMP	Control de Caudal Pico	Reducción Volumen	Control de contaminantes	Conservación y reutilización
Humedales artificiales (*constructed wetlands*)	Alto	Alto	Alto	No
Estanques de retención (*retention ponds*)	Alto	Alto	Medio	No
Depósitos de detención (*detention basins*)	Alto	Alto	Bajo	No
Depósitos de infiltración (*infiltration basins*)	Medio	Medio	Alto	No
Cunetas verdes (*vegetated swales*)	Medio	Medio	Alto	No
Drenes filtrantes (*filter drains*)	Medio	Medio	Medio	No
Pozos y zanjas de infiltración (*soakaways and infiltration trenches*)	Medio	Medio	Alto	No
Franjas Filtrantes (*filter strips*)	Bajo	Bajo	Medio	No
Superficies permeables (*porous/permeable paving*)	Medio	Medio	Medio	No
Sistemas de retención /almacenamiento (*rainwater harvesting/retention systems*)	**Medio**	**Medio**	**Bajo**	**Si**
Cubiertas verdes (*green roofs*)	Medio	Bajo	Medio	No
Bio retención/jardines de lluvia (*bioretention/rain gardens*)	Medio	Bajo	Medio	No

Nótese que la práctica de retención/almacenamiento del agua lluvia (rainwater harvesting/retention systems) se encuentra resaltada. Lo anterior es debido a que este documento, a partir de ahora, se va

[5] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://eichlervision.com/2009/01/inspiration-from-margarido-house-tour/. Consultada el 18 de diciembre del 2013.

[6] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://www.taringa.net/posts/info/16529906/Techos-verdes-para-todos.html. Consultada el 18 de diciembre del 2013.

a centrar en este tipo de estructuras. Nótese que corresponde a una práctica LID, es decir una tecnología aplicada directamente en el sitio donde cae el agua lluvia direccionada a mantener o reestablecer el régimen hidrológico antecedente al fenómeno de urbanización. Tiende a ser un mecanismo aplicado solamente a una escala predial (micro escala), y tiene un control medio de atenuación del caudal pico y volumen de escorrentía, un control bajo de los contaminantes, pero permita la reutilización y conservación del agua. En los siguientes capítulos se profundizará en los tipos de sistemas de retención/almacenamiento de agua lluvia, sus principales características, sus consideraciones de diseño, su desempeño y eficiencia en cuanto a la calidad y cantidad de la escorrentía, sus consideraciones de operación y mantenimiento y algunas experiencias reales y casos de aplicación.

3. SISTEMAS DE RETENCIÓN DE AGUA LLUVIA A NIVEL PREDIAL

3.1. Descripción General

El almacenamiento, retención o detención del agua lluvia es una de las diversas alternativas para reducir los volúmenes de escorrentía, mejorar la calidad del agua e incluso emplearla para consumo humano o reutilización. Dentro de las demás tecnologías disponibles, el almacenamiento del agua lluvia corresponde a una solución sostenible y descentralizada la cual puede evitar una gran cantidad de problemas ambientales generados por los excesos de agua lluvia.

Existen diversas definiciones acerca de este tipo de práctica. Según [52], la retención/almacenamiento del agua lluvia es una tecnología empleada para recolectar y almacenar el agua lluvia de los techos o de las superficies impermeables para uso humano, empleando desde técnicas simples hasta complejas (de ingeniería). Para [49], el almacenamiento del agua lluvia corresponde a una práctica sostenible que es capaz de suplir el agua de una forma mucho más eficiente y que además es muy fácil de instalar y operar. Corresponde a la recolección y distribución del agua lluvia de los techos para propósitos humanos y/o ambientales. Por otro lado, según el manual de almacenamiento de agua lluvia de Texas [53], la retención de agua lluvia es la recolección, transporte y almacenamiento del agua lluvia para una gran cantidad de propósitos incluyendo la irrigación, reuso y consumo humano, recarga de acuíferos y reducción de los volúmenes de escorrentía. Por otra parte, todas las fuentes consultadas afirman que existe evidencia arqueológica que permite inferir que la recolección de agua lluvia empezó hace aproximadamente 4,000 años pues se han encontrado ruinas de cisternas.

De acuerdo con la literatura, las ventajas y beneficios más importantes de los sistemas de almacenamiento/detención del agua lluvia se resumen a continuación [54, 55]:

- Tienen la capacidad de proveer agua en o cerca del sitio donde se necesita o es usada, evitando así la necesidad de tener sistemas de distribución.
- Reducen los volúmenes de escorrentía y las cargas de contaminantes que entran al sistema de drenaje reduciendo así los picos de caudal en eventos fuertes de lluvia y mejorando la calidad del agua.
- Pueden constituir en una alternativa muy eficiente para el manejo del agua lluvia urbana para condiciones en donde evitar el empleo de superficies impermeables es imposible o el espacio es insuficiente (áreas altamente urbanizadas).
- En la mayoría de casos, pueden ser operados y mantenidos por el mismo propietario.
- La construcción de un sistema de almacenamiento de agua lluvia es relativamente sencilla y pueden cumplir casi cualquier requerimiento.
- Reduce la erosión urbana.

- El agua recolectada de las estructuras existentes (techos y superficie impermeables) es relativamente limpia y no requiere de tratamientos sofisticados debido a que se captura en la fuente.

- Ayudan a reducir el pico de demanda en verano y por consiguiente retardan las expansiones de plantas de tratamiento existentes.

- Pueden proveer de agua a la población en casos de emergencia o cuando se generen cortes del servicio de agua.

De acuerdo con la literatura, las desventajas y/o limitaciones más importantes de los sistemas de almacenamiento/detención del agua lluvia se resumen a continuación [54, 55]:

- Un sistema de almacenamiento de agua lluvia con baja capacidad, limita la cantidad de agua lluvia que puede ser retenida y por lo tanto para periodos de sequía prolongados, no representa una tecnología confiable. Incrementar la capacidad de almacenamiento, aumenta los costos lo cual puede generar problemas en comunidades de bajos ingresos.

- El almacenamiento de agua lluvia depende tanto de la frecuencia como de la cantidad de agua lluvia, y por lo tanto no constituye una fuente de agua confiable para sequías prolongadas.

- La capacidad de almacenamiento del sistema necesita estar disponible para cuando se presenta un evento de lluvia, y por esto, muchos sistemas pueden resultar ineficientes para temporadas muy lluviosas.

- Existe un gran número de consideraciones a la hora de ubicar un sistema de almacenamiento de agua lluvia, razón por la cual se puede limitar la viabilidad de esta técnica.

- El agua puede contaminarse por excremento de animales y material orgánico proveniente de las hojas de los árboles. Igualmente pueden generar crecimiento de algas o mosquitos si no se lleva a cabo un adecuado mantenimiento.

- Las fugas de las cisternas subsuperficiales pueden generar inestabilidades del terreno causando problemas estructurales.

- El almacenamiento de agua lluvia puede generar un problema si se requiere para consumo humano y no se tienen los sistemas de potabilización requeridos.

La implementación de estos sistemas ha tenido un boom alrededor del mundo debido a las constantes y cada vez más seguidas sequías e inundaciones. Muchos gobiernos han establecido las regulaciones, estándares y guías para su instalación, operación y mantenimiento, e inclusive han establecido toda clase de incentivos para que la población los adopte [49]. En los países en vías de desarrollo, todavía no se encuentra bien regulado o la regulación que existe no es lo suficientemente clara para que se empiece a adoptar esta tecnología de forma masiva.

3.2. Componentes

Típicamente un sistema de almacenamiento/detención de agua lluvia consiste de cuatro elementos básicos: el área de captación, el sistema de recolección y transporte, el de almacenamiento y el de entrega o distribución. A nivel predial, un sistema de estos puede ser tan sencillo o complejo como se desee pero en general consta de estos componentes indispensables [54, 56]:

1. Área de Captación: Corresponde al área a la cual el agua lluvia cae (generalmente techos y superficies impermeables como pavimentos, etc.). El techo debe ser construido con materiales no porosos y debe tener un drenaje eficiente.

2. Sistema de Recolección y Transporte: Corresponde a la red de canales y bajantes mediante los cuales se transporta el agua lluvia recolectada de los techos y demás superficies hacia la estructura de almacenamiento. Generalmente consiste en la conexión de una o más bajantes con las canaletas que recolectan el agua que drena de los techos, y se recomienda que sean de aluminio y de sección transversal circular. El tamaño y la pendiente de las canaletas se diseñan dependiendo de los regímenes de lluvia de la región (en el numeral 3.4. se profundiza en los aspectos de diseño). Un aspecto muy importante del sistema de recolección y transporte es que debe considerar dispositivos de pre tratamiento del agua, con el fin de evitar que sedimentos, hojas, basura y ciertos contaminantes entren al almacenamiento. Estos dispositivos deben ser muy fáciles de mantener, y pueden existir o no dependiendo del volumen de almacenamiento. En los numerales 3.4. y 7 se profundiza sobre estos dispositivos, su diseño y sus consideraciones de operación y mantenimiento. Dentro de estos se encuentran:

    - *Pantalla/filtro para hojas (leaf screen):* Pantalla filtro de aberturas grandes a medianas que se coloca justo antes de la bajante y que evita que allí entren hojas y otros desechos de tamaño considerable. Deben ser limpiadas periódicamente para asegurar su buen funcionamiento, pues si este no se realiza, se puede taponar el sistema evitando que el agua llegue al almacenamiento.

    - *Desviador de primer lavado (first flush diverter):* Tecnología empleada para evitar que el agua lluvia correspondiente al primer lavado entre en el elemento de almacenamiento. Este mecanismo puede reducir efectivamente contaminantes más pequeños y correspondientes al agua del primer lavado, tales como polen, heces, etc. Requieren que sean manipulados después de cada evento de lluvia, al extraer manualmente el agua retenida del primer lavado, y de esta forma asegurar su eficiencia para el siguiente evento.

    - *Tanques sedimentadores (bafle tanks o roof washers):* Son colocados justo antes de que el agua entre en el sistema de almacenamiento y son empleados para sedimentar y filtrar el material particulado sobrante del agua que viene de las bajantes. Esta tecnología ayuda a que no se genere acumulación de sedimentos en el sistema de almacenamiento principal.

- *Filtro de vórtice (vortex filter):* Empleados para almacenamiento a gran escala, es decir para agua recolectada de grandes áreas de techo. Funcionan como sedimentadores y filtros y son más pequeños que los tanques sedimentadores.

3. Sistema de almacenamiento: Corresponde al tanque o la cisterna en la cual se va a almacenar el agua lluvia. Puede ser de distintos tamaños, formas, superficiales, subsuperficiales, más de uno, etc. Es en esencia el elemento más importante y costoso de un sistema de recolección y almacenamiento de agua lluvia. Su capacidad puede variar entre los 50 y 100,000 galones. Su tamaño es diseñado teniendo en cuenta la demanda de agua y tratamiento de la escorrentía que se le quiera dar.

4. Sistema de Entrega o Distribución: Corresponde al sistema mediante el cual se va a devolver el agua lluvia al sistema de alcantarillado (control de escorrentía) o mediante el cual se va a reutilizar dentro del predio (reuso). Muchos de los sistemas de entrega requieren de una bomba para poder llevar el agua desde la estructura de almacenamiento hasta su destino final, bien sea para consumo humano, irrigación o para el sistema de drenaje. Igualmente, se debe tener un mecanismo de desbordamiento (overflow mechanism) con el fin de evacuar el agua lluvia de exceso que puede ser almacenada en el almacenamiento. Dicho mecanismo consta de tubería(s) conectada(s) al almacenamiento con capacidad mayor o igual que la(s) de entrada. Asimismo, se puede tener un sistema de tratamiento o purificación, el cual corresponde a los filtros y demás tratamientos necesarios en caso de que se requiera emplear el agua para consumo humano.

En la siguiente imagen se puede apreciar un esquema típico acerca de un sistema de almacenamiento/detención del agua lluvia con cada uno de los componentes descritos anteriormente.

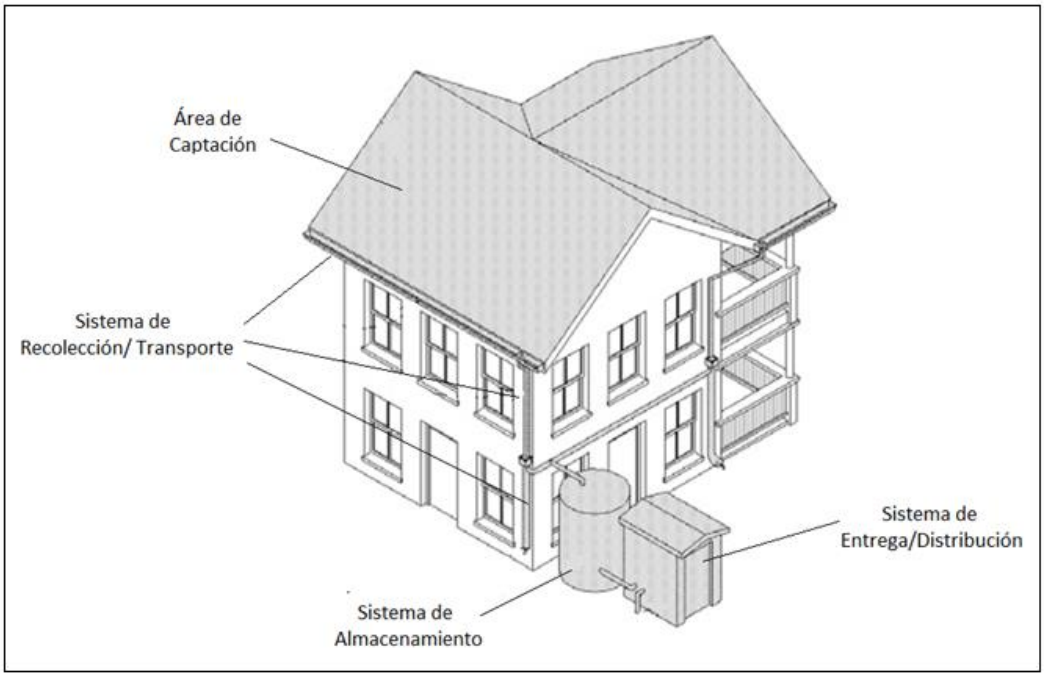


Figura 3-1. Esquema típico de un sistema de almacenamiento/detención con cada uno de los componentes básicos (Adaptada de [53]

Según lo anterior, y tal como lo resume el documento de revisión de literatura de la EPA [57], el almacenamiento o detención del agua lluvia básicamente se puede dividir en tres grandes áreas según su propósito: En primer lugar tiene como fin la reutilización, irrigación y consumo/reuso humano. En segundo lugar, la reducción de los volúmenes de escorrentía, picos de caudal con el fin de prevenir inundaciones. Y finalmente, para mejorar la calidad del agua, al reducir los contaminantes. A partir de este momento, solo se va a hacer énfasis en la segunda área, es decir que solo se va a analizar dicha técnica para la reducción de volúmenes de escorrentía y picos de caudal, pues este tema es el interés fundamental de este documento.

El almacenamiento/detención, con el fin de reducir volúmenes de escorrentía y picos de caudal, es considerada como una técnica LID (Low Impact Development) para el manejo sostenible del agua lluvia. Al retener el agua lluvia en la fuente, estos sistemas (adoptados masivamente) ayudan a reducir el volumen de agua que entra en el sistema de alcantarillado para cualquier evento de lluvia considerable, ayudando así a reestablecer las condiciones hidrológicas pre-urbanización y reducir impactos negativos como inundaciones. El almacenamiento/detención de aguas lluvias a nivel predial mediante estructuras o tecnologías puede ser de distintas formas: pasivo, activo, superficial y subsuperficial.

En los siguientes numerales de este capítulo (3.3. – 3.4.), se discutirán las consideraciones y criterios de diseño más relevantes a la hora de implementar estos sistemas de almacenamiento de agua lluvia a nivel predial.

3.3. Consideraciones de Diseño

Una gran cantidad de especificaciones y consideraciones deben ser tenidas en cuenta e influencian la forma en la cual los sistemas de almacenamiento de agua son diseñados, construidos, operados y mantenidos. Los siguientes numerales (3.3.1 a 3.3.3) hacen énfasis precisamente en estos aspectos que son importantes al momento de implementar estas tecnologías. Deben ser adoptadas como recomendaciones y no constituyen el diseño como tal, pero aun así, deben ser consideradas para el diseño de las técnicas de almacenamiento de agua lluvia.

3.3.1. Condiciones del sitio

En cuanto a las condiciones del sitio en el cual se va a implementar una tecnología para el almacenamiento del agua lluvia, es necesario considerar los siguientes aspectos [56]:

- Espacio disponible: Limitaciones de espacio son un problema muy raro en la implementación de sistemas de almacenamiento de agua lluvia si estos son considerados desde un principio en la construcción. Aun así, es indispensable que el sistema de retención tenga el espacio suficiente para poder operar adecuadamente (mecanismo de desbordamiento). Las estructuras pueden colocarse adentro o afuera de las construcciones y pueden ser superficiales, subsuperficiales o elevadas.

- Cimientos de los establecimientos: Se debe garantizar que los desbordes de los sistemas de almacenamiento se diseñen para evitar la saturación del suelo que puedan generar asentamientos que afecten las cimentaciones de la estructura adyacente. Se recomienda que se ubiquen a 10 pies como mínimo de las estructuras.

- Altura hidráulica requerida: La altura hidráulica requerida depende directamente del uso que se le quiera dar al agua almacenada. Cuando se requiera para irrigación de jardines o actividades afuera del establecimiento, el tanque debe ser ubicado un poco más arriba que el nivel del suelo. Cuando se requiera para uso interno (baños, lavandería, etc), el agua debe ser bombeada al interior a un tanque más pequeño el cual se encargará de suministrarla a presión. Si se requiere menor presión, el tanque puede ser ubicado encima del establecimiento para que su abastecimiento funcione por gravedad.

- Material de los techos: La calidad del agua para almacenamiento puede depender en gran medida del material y de las condiciones del ADC, es decir de los techos. El agua almacenada de ciertos tipos de techos, tales como de asfalto, grava, pintados, de metal galvanizado, de metal de hoja o en general de cualquiera que contenga asbestos, puede traer consigo ciertos metales u otros componentes tóxicos. En general no se debe almacenar el agua de este tipo de techos para asegurar la buena calidad y funcionamiento del sistema.

- Nivel freático: Para tanques subterráneos, es fundamental que éstos se ubiquen por encima del nivel freático para evitar infiltración problemas estructurales del mismo. Para casos en los cuales es inevitable lidiar con el nivel freático, es indispensable realizar un diseño estructural adecuado y tomar medidas de prevención estrictas.

- Topografía del sitio: La topografía del sitio es un aspecto fundamental a la hora de ubicar un sistema de almacenamiento de agua lluvia, pues esta finalmente determina la energía y gran parte de las características hidráulicas del sistema. Igualmente, la ubicación del tanque y la topografía juegan un papel muy importante en la cantidad de bombeo necesario. Ubicar un tanque en un sitio bajo puede hacer más fácil el transporte del agua desde los techos hasta éste, pero puede requerir de un mayor bombeo. De la misma forma, ubicar un tanque en un sitio elevado puede hacer más difícil el transporte del agua desde los techos hasta éste (diámetros más grandes y pendientes más bajas), pero puede requerir de un menor bombeo.

- Suelos: Los tanques de almacenamiento solo pueden ser colocados en los suelos propios del sitio o de acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante. La capacidad portante del suelo en el cual se va a ubicar un tanque debe ser tenida en cuenta para evitar asentamientos o fallas en el suelo, pues el peso de un tanque lleno es considerable y puede constituir en una carga puntual bastante elevada. Se recomienda que para tanques subterráneos grandes, se construya una base de agregados o concreto para aumentar el área de contacto y que la carga se distribuya.

- Área de drenaje contribuyente: El área de drenaje contribuyente (ADC) generalmente consiste solo en los techos mediante los cuales el agua escurre y llega al sistema de almacenamiento. Áreas de parqueo y otro tipo de superficies impermeables también pueden constituir el ADC, pero aspectos especiales de limpieza (sedimentadores, filtros, etc.) deben ser tenidos en cuenta. El agua proveniente desde el ADC debe llegar a la estructura de

retención mediante tuberías o canaletas, y no por medio de otras superficies que puedan incrementar los índices de contaminación del agua.

- Calidad del agua lluvia: Se debe considerar la calidad del agua lluvia del sitio en el cual se pretende instalar un sistema de almacenamiento, puesto que ciertas condiciones como el pH pueden afectar la funcionalidad del mismo.

- Interferencia con elementos subterráneos: Cuando se va a ubicar un tanque de almacenamiento, es indispensable que se tengan en cuenta los posibles elementos estructurales y no estructurales que se encuentran debajo del suelo. Dichos elementos deben ser evitados y aislados durante la ubicación del tanque para evitar un posible desastre.

- Carga vehicular: Se debe tener especial cuidado cuando se ubican tanques de almacenamiento subterráneo en lugares en los cuales puede existir una carga vehicular. Es necesario tener en cuenta estas cargas para evitar que el sistema colapse a mediano-largo plazo.

3.3.2. Usos del agua lluvia

Según lo anterior, y tal como lo resume el documento de revisión de literatura de la EPA [57], el almacenamiento o detención del agua lluvia básicamente se puede dividir en tres grandes áreas según su propósito: En primer lugar tiene como fin la reutilización, irrigación y consumo/reuso humano. En segundo lugar, la reducción de los volúmenes de escorrentía, picos de caudal con el fin de prevenir inundaciones. Y finalmente, para mejorar la calidad del agua, al reducir los contaminantes. Entonces, antes de implementar un sistema de almacenamiento de agua lluvia es fundamental especificar el uso que se le quiere dar, pues esta decisión dictaminará el tren de diseño a emplear en las futuras etapas del proyecto.

3.3.3. Objetivos de diseño y configuraciones

Muchas variaciones pueden ser tenidas en cuenta a la hora de implementar un sistema de retención de agua lluvia bien sea para suplir demanda interna o para controlar la escorrentía urbana. En general, la literatura plantea tres posibles configuraciones básicas para ser tenidas en cuenta dependiendo de las prioridades o necesidades que se requieran. Es importante aclarar que dichas configuraciones están basadas en el uso que se le quiera dar al agua almacenada: de consumo interno, externo y/o reducción de la escorrentía. Consumo interno hace referencia a la utilización del agua dentro del establecimiento, es decir para actividades como lavandería, baño, e inclusive consumo directo. Consumo externo significa la utilización del agua lluvia para actividades fuera del establecimiento tales como lavado de carros o irrigación de jardines. Control o reducción de la escorrentía hace referencia a alivios al sistema de drenaje. A continuación se presentan dichas configuraciones [56]:

Configuración Sistema 1: Consumo completo interno con consumo externo opcional

La primera configuración hace referencia al uso del agua para consumo completo interno y uso externo opcional. Debido a que no existe un uso para control de la escorrentía irrigación, el diseño

debe solo centrarse en el abastecimiento interno del establecimiento, es decir que debe ser equipado con bombas o tanques de presión de ser necesario.

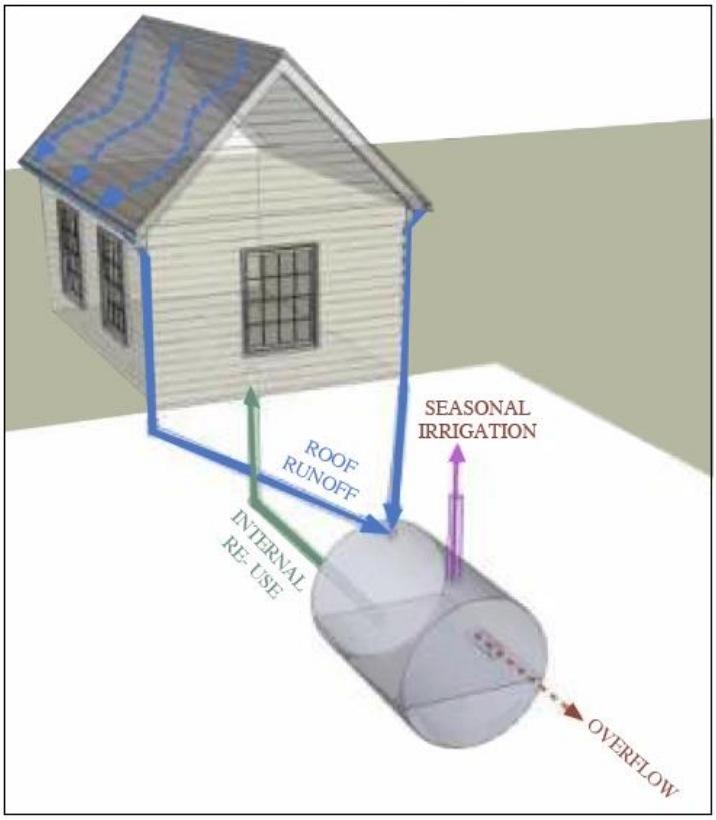


Figura 3-2. Configuración sistema 1: Consumo completo interno con consumo externo opcional (Fuente: [56])

Configuración Sistema 2: Consumo parcial externo con reducción y control completo de la escorrentía

La segunda configuración hace referencia al uso del agua para consumo parcial externo y uso para la reducción y control de la escorrentía. Las tasas de entrada y salida del tanque deben ser diseñadas basadas en las propiedades de infiltración, área superficial y la capacidad de las demás alternativas circundantes del control de escorrentía. Esta configuración también sirve como facilidad de despensa de agua, para temporadas en las cuales no haya irrigación o consumo externo. En este orden de ideas, el tanque debe proveer algún nivel mínimo de almacenamiento y reuso, acompañado de un mecanismo de desbordamiento apropiado. En el numeral 3.4 se profundiza en los aspectos de diseño concernientes a los tanques de almacenamiento.

Configuración Sistema 3: Consumo completo interno, consumo parcial externo con reducción y control parcial de la escorrentía

La tercera configuración hace referencia al uso del agua para consumo completo interno, uso del agua para consumo parcial externo y uso para el control parcial de la escorrentía. El control parcial

de la escorrentía se lleva a cabo en los meses en los cuales no se requiere irrigación para obtener un mayor espacio de almacenamiento.

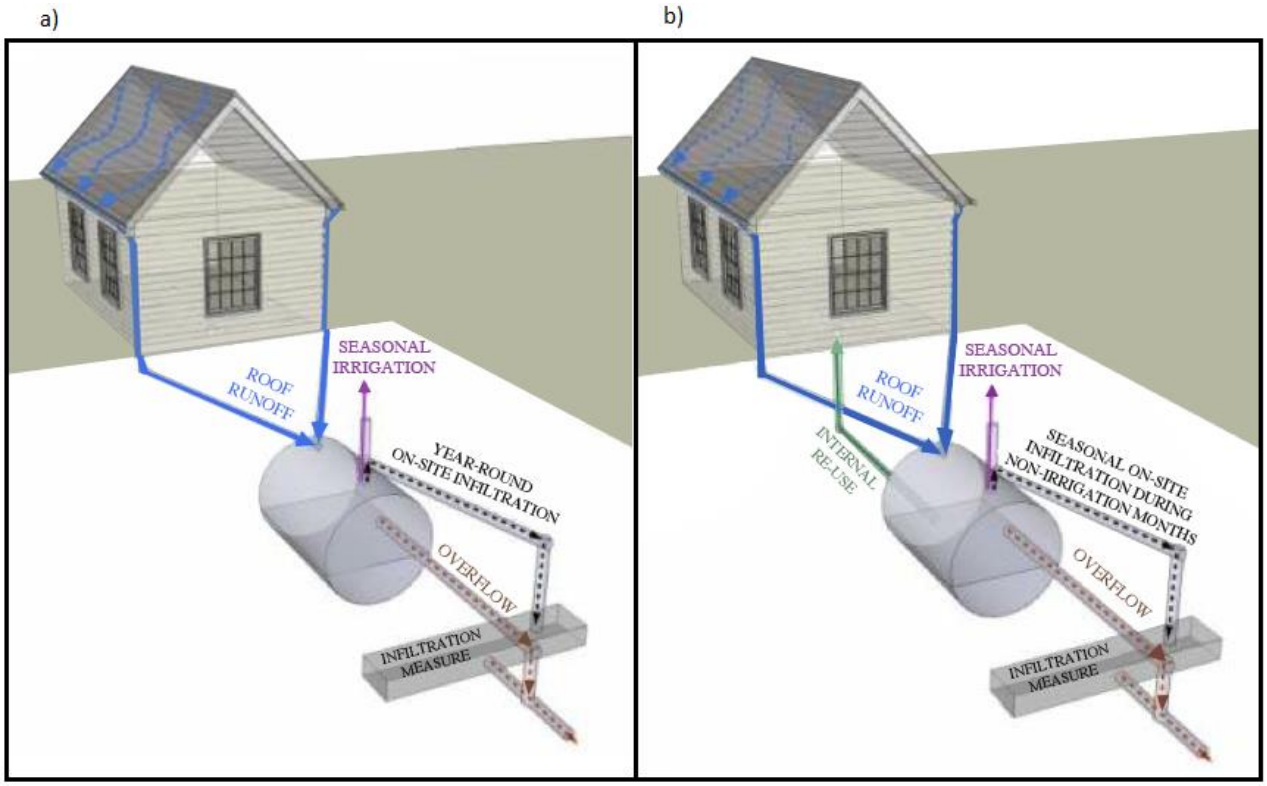


Figura 3-3. a) Configuración sistema 2: Consumo parcial externo con reducción y control completo de la escorrentía (Fuente: [56]), b) Configuración sistema 3: Consumo completo interno, consumo parcial externo con reducción y control parcial de la escorrentía (Fuente: [56])

Los tanques o cisternas prefabricadas típicamente tienen capacidades que varían entre 250 a 100,000 galones. En general existen tres configuraciones básicas empleadas para suplir las necesidades de las 3 configuraciones del sistema mostradas anteriormente. Estas se muestran a continuación [56, 58]:

Configuración Tanque 1:

La primera configuración reserva la máxima capacidad de almacenamiento del tanque para propósitos de reutilización y consumo, es decir que maximiza el volumen disponible asociado con el volumen de tratamiento (T_V) y el volumen empleado para suplir la demanda. El objetivo principal es el de mejorar la calidad del agua para consumo. Un mecanismo de desbordamiento es instalado para casos de emergencia cerca del borde superior del tanque, dejando un pequeño volumen adicional por encima de este para casos en los cuales el nivel incremente mucho durante un evento prolongado de lluvia.

Configuración Tanque 2:

La segunda configuración de tanque es bastante similar a la primera, pero incluye un pequeño orificio situado debajo del mecanismo de desbordamiento para proveer mayor control ante los

eventos de lluvia. Este mecanismo crea un nuevo volumen adicional dedicado para la detención del volumen de escorrentía generada ante un evento de lluvia, es decir para mitigación de inundaciones y protección del sistema de drenaje. Debido a que este orificio más pequeño limita las tasas de descarga, lo cual depende del almacenamiento ubicado por encima de éste, mucho menos volumen es disponible para reutilización y consumo humano. Es decir que esta configuración es una combinación entre el volumen dedicado a la mitigación de la escorrentía, y el volumen destinado para reutilización y consumo humano.

En la siguiente figura se pueden apreciar dos esquemas que caracterizan la configuración de tanque 1 y configuración de tanque 2 respectivamente descritas anteriormente.

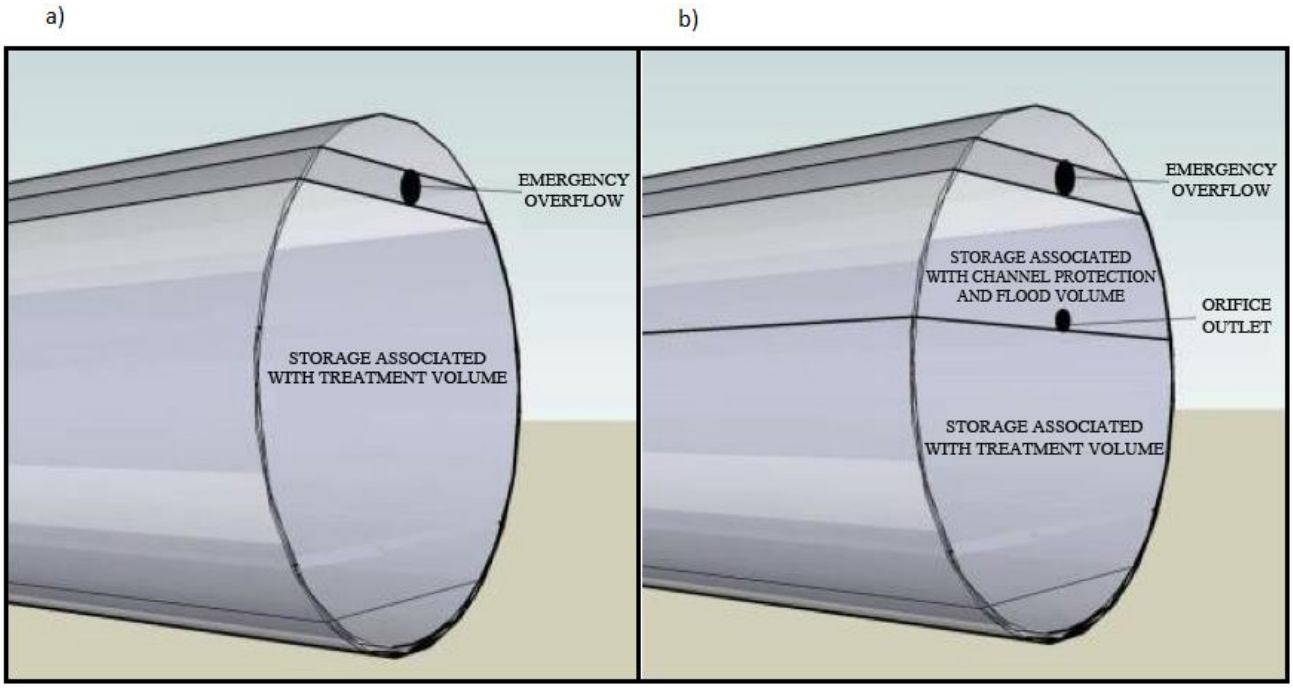


Figura 3-4. a) Esquema configuración tanque 1 (Fuente: [58]), b) Esquema configuración tanque 2: (Fuente: [58])

Configuración Tanque 3:

Esta configuración es bastante similar a la anterior, pero hace que se mantenga un constante nivel dentro del sistema. Dicho nivel es facilitado mediante un orificio más pequeño ubicado muy cerca del fondo del tanque y el agua que por allí sale, puede ser desviada hacia una segunda alternativa de control de escorrentía (tal como un jardín o zanja de infiltración). El propósito de este mecanismo es permitir que cierta parte de la escorrentía se infiltre en el suelo y llegue al nivel freático, reduciendo de esta forma el volumen ocupado en el tanque y el volumen que llega al sistema de drenaje ante un evento intenso de lluvia. Esta última configuración es útil para casos en los cuales la demanda no es suficiente para drenar niveles de agua en el tanque entre eventos de lluvia. Es igualmente útil para sitios que emplean el agua almacenada para irrigación durante parte del año y que no tienen otro tipo de uso para la otra parte del año. En la siguiente figura se puede apreciar un esquema que caracteriza la configuración de tanque 3 descrita anteriormente.

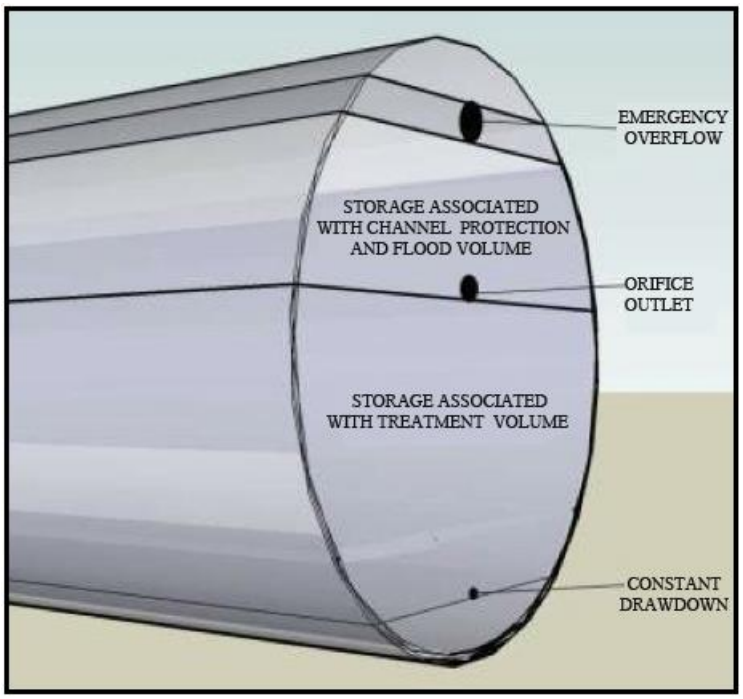


Figura 3-5. Esquema configuración tanque 3 (Fuente: [56])

3.4. Criterios de Diseño

En este numeral, se van a analizar los parámetros, criterios y el tren de diseño que se tiene que tener en cuenta para la implementación de un sistema de retención/almacenamiento de agua lluvia. Debido a lo anterior, es necesario analizar cada componente por separado. Recordando del numeral 3.2, los componentes básicos de estos sistemas son: área de captación, sistema de recolección y transporte, sistema de almacenamiento y sistema de entrega o distribución.

3.4.1. Área de captación

El área de captación corresponde al área a la cual el agua lluvia cae (generalmente techos). El área de captación generalmente consiste solo en los techos mediante los cuales el agua escurre y llega al sistema de almacenamiento. Áreas de parqueo y otro tipo de superficies impermeables también pueden constituir el ADC, pero aspectos especiales de limpieza (sedimentadores, filtros, etc.) deben ser tenidos en cuenta. El agua proveniente desde el área de captación debe llegar a la estructura de retención mediante tuberías o canaletas, y no por medio de otras superficies que puedan incrementar los índices de contaminación del agua.

Por otro lado, la calidad del agua para almacenamiento puede depender en gran medida del material y de las condiciones del área de captación, es decir de los techos. El agua almacenada de ciertos tipos de techos, tales como de asfalto, grava, pintados, de metal galvanizado, de metal de hoja o en general de cualquiera que contenga asbestos, puede traer consigo ciertos metales u otros componentes

tóxicos. En general no se debe almacenar el agua de este tipo de techos para asegurar la buena calidad y funcionamiento del sistema.

Lo más importante es poder cuantificar el agua lluvia que puede ser capturada por el área de captación. Según [53], de una superficie estándar de un área de captación, se recolectan 0.62 galones por cada pie cuadrado, equivalente a 25.27 litros por metro cuadrado. De todas formas, la literatura consultada recomienda emplear el método racional para su estimación. Lo que es indispensable conocer es el régimen promedio anual de lluvia del sitio en el cual se planea implementar el almacenamiento. El cálculo del agua capturada por el área de captación es sencillo [54]:

$$ac = p * AC * R$$

En donde *ac* corresponde al agua capturada (L/año), *p* a la precipitación promedio anual (mm/año), *AC* al área de captación del sistema (m²) y *R* al coeficiente de escorrentía del material del cual está fabricada el área de captación (-).

Es importante mencionar que el área de captación no corresponde a todo el techo, sino solo a la fracción conectada al sistema de almacenamiento, es decir conectada al sistema de canaletas-bajantes que finalmente termina en la estructura de detención. A continuación se muestra un esquema general de un área de captación típica (techo) con su área contribuyente.

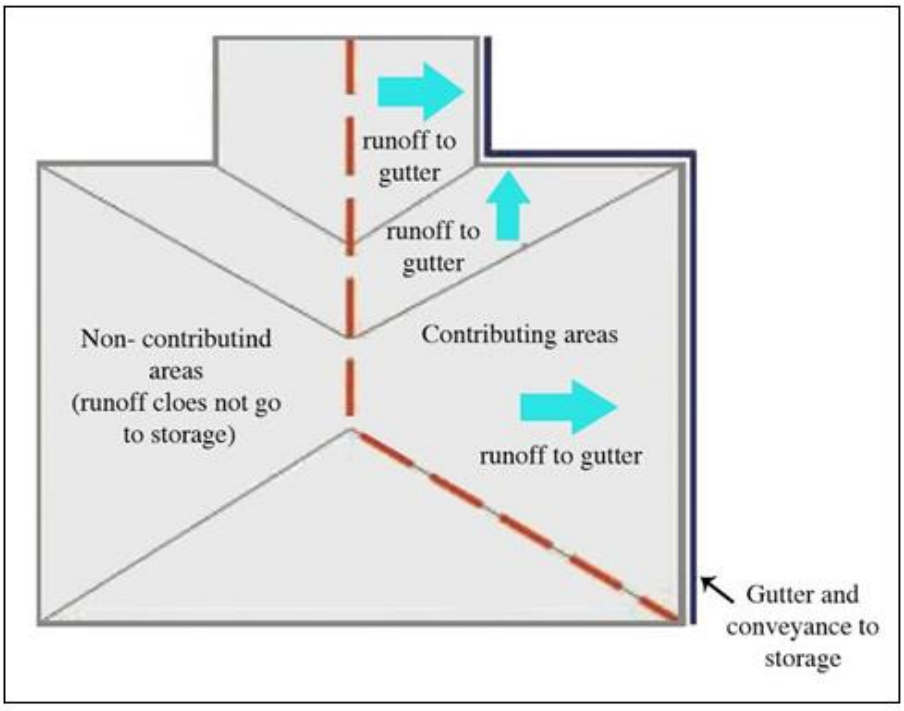


Figura 3-6. Esquema general de un área de captación típica (techo) con su área contribuyente respectiva. (Adaptada de: [54])

El coeficiente de escorrentía (*R*) es la cantidad de agua que efectivamente escurre (o se transforma en escorrentía) de una superficie. Por ejemplo un coeficiente de escorrentía de 0.8 significa que el 80% del agua que efectivamente cayó en una superficie se convirtió en escorrentía, y el 20% restante se quedó en la superficie. Superficies metálicas con pendientes más pronunciadas tienen un coeficiente de escorrentía mayor que superficies fabricadas en concreto y con una pendiente menos pronunciada.

Igualmente, la evaporación en la superficie también afecta el coeficiente de escorrentía. A continuación se presentan algunos de los coeficientes de escorrentía según distintos materiales y áreas de captación, y que se pueden emplear para calcular el agua capturada.

Tabla 3-1. Algunos coeficientes de escorrentía según distintos materiales y áreas de captación (Adaptada de: [54])

Type of Catchment	Coefficients
Roof Catchments	
Tiles	0.8 - 0.9
Corrugated metal sheets	0.7 - 0.9
Ground Surface Coverings	
Concrete	0.6 - 0.8
Brick pavement	0.5 - 0.6
Untreated ground catchments	
Soils on slopes less than 10%	0.1 - 0.3
Rocky natural catchments	0.2 - 0.5

El área de captación (*AC*) depende de la geometría de la superficie (largo y ancho) y del ángulo de inclinación de la misma. Si el área de captación es prácticamente plana, no es necesario hacer ningún ajuste por inclinación, y por lo tanto se calcula solamente con los parámetros geométricos. Si el área no es simétrica, es necesario dividirla en partes a las cuales sea más fácil determinarles el área y sumarlas todas al final. Si por el contrario, el área de captación tiene una pendiente pronunciada o detectable, es necesario ajustarla de acuerdo con el ángulo de inclinación.

En ciertos manuales y guías acerca del almacenamiento de agua lluvia se encuentra más detallado el procedimiento de cálculo empleado para determinar el agua capturada por un área de captación en un sistema de estos [54, 53, 56]. Igualmente, se puede emplear el método desarrollado por la NRCS (National Resources Conservation Service) o el método racional modificado para calcular volúmenes y caudales de escorrentía [59, 60, 61].

3.4.2. Sistema de recolección y transporte

El sistema de recolección y transporte corresponde a la red de canaletas y bajantes mediante los cuales se transporta el agua lluvia recolectada de los techos y demás superficies hacia la estructura de almacenamiento. Generalmente consiste en la conexión de una o más bajantes con las canaletas que recolectan el agua que drena de los techos. El tamaño y la pendiente de las canaletas se diseñan dependiendo de los regímenes de lluvia de la región y del área de captación. En la Figura 3-7 se ilustra un ejemplo típico de un sistema de recolección y transporte y un esquema general de este tipo de sistema conformado por canaletas y bajantes.

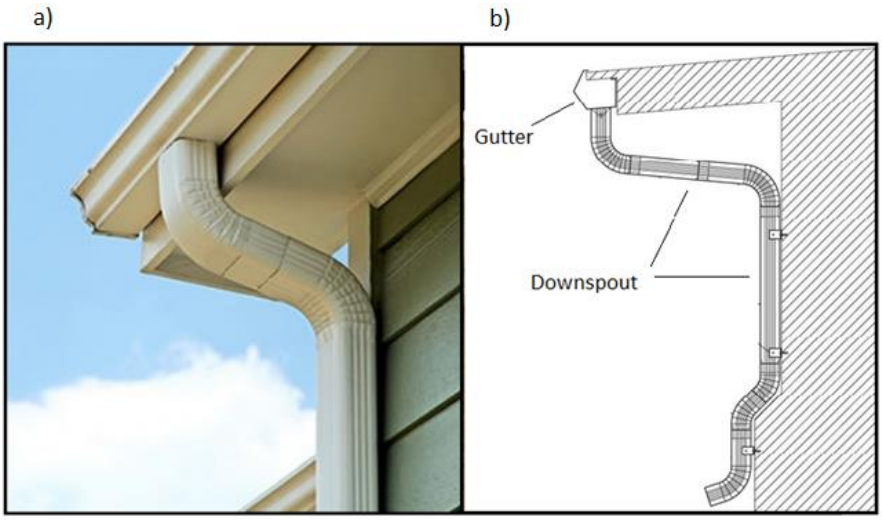


Figura 3-7. a) Ejemplo típico de un sistema de recolección y transporte[7], b) esquema general de un sistema de recolección y transporte conformado por canaletas y bajantes.[8]

Las canaletas y bajantes pueden ser fabricadas en una gran cantidad de materiales pero el más empleado es el policloruro de vinilo (PVC) seguido por el metal galvanizado debido a que no se degeneran y aseguran la buena calidad del agua transportada. No deben existir zonas planas en donde se genere estancamiento, pues eso puede generar crecimiento de mosquitos y algas. Las canaletas deben tener una pendiente dirigida hacia la estructura de almacenamiento y ésta debe ser igual o mayor que un centímetro por metro, es decir mayor o igual que una pendiente del 1%. El tamaño (ancho) de las canaletas y bajantes se diseñan dependiendo del área de captación correspondiente. Los manuales [62, 54], recomiendan la siguiente guía (basada en estudios científicos) para determinar el tamaño de estas estructuras dependiendo del área de captación.

Tabla 3-2. Guía para el dimensionamiento de canaletas y bajantes dependiendo del área de captación (Adaptada de: [62])

Roof Area (m²) Served by one gutter	Gutter width (mm)	Minimum diameter of downpipe (mm)
17	60	40
25	70	50
34	80	50
46	90	63
66	100	63
128	125	75
208	150	90

Un aspecto muy importante del sistema de recolección y transporte es que debe considerar dispositivos de pre tratamiento del agua, con el fin de evitar que sedimentos, hojas, basura y ciertos contaminantes entren al almacenamiento. Estos dispositivos deben ser muy fáciles de mantener, y

[7] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://www.rain-gutter-guide.com/gutter-downspouts.html. Consultada el 6 de diciembre del 2013.

[8] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://www.todaysfacilitymanager.com/2010/02/new-product-flash-roll-formed-downspouts-by-mbci. Consultada el 6 de diciembre del 2013.

pueden existir o no dependiendo del volumen de almacenamiento. En el Capítulo 8 se profundiza sobre sus consideraciones de operación y mantenimiento. Dentro de estos se encuentran:

Pantallas/filtros para hojas y desechos (leaf-debris screens): Pantallas filtro de aberturas grandes a medianas que se coloca justo antes de la(s) bajante(s) y que evita que allí entren hojas y otros desechos de tamaño considerable. Deben ser limpiadas periódicamente para asegurar su buen funcionamiento, pues si este no se realiza, se puede taponar el sistema evitando que el agua llegue al almacenamiento.

Pantallas de desechos/vectores (debris/vectors screens): Pantallas filtro de aberturas muy pequeñas que se coloca justo antes del elemento de almacenamiento y en todas las salidas del mismo y que evita que allí entren desechos de menor tamaño y mosquitos.

En la Figura 3-8 a) se muestra un esquema general de una pantalla/filtro ubicada justo antes de un elemento de almacenamiento, b) un ejemplo típico de una pantalla/filtro de hojas y desechos ubicada en una canaleta y c) un ejemplo típico de una pantalla/filtro de desechos y vectores ubicada en el interior de un tanque de retención.

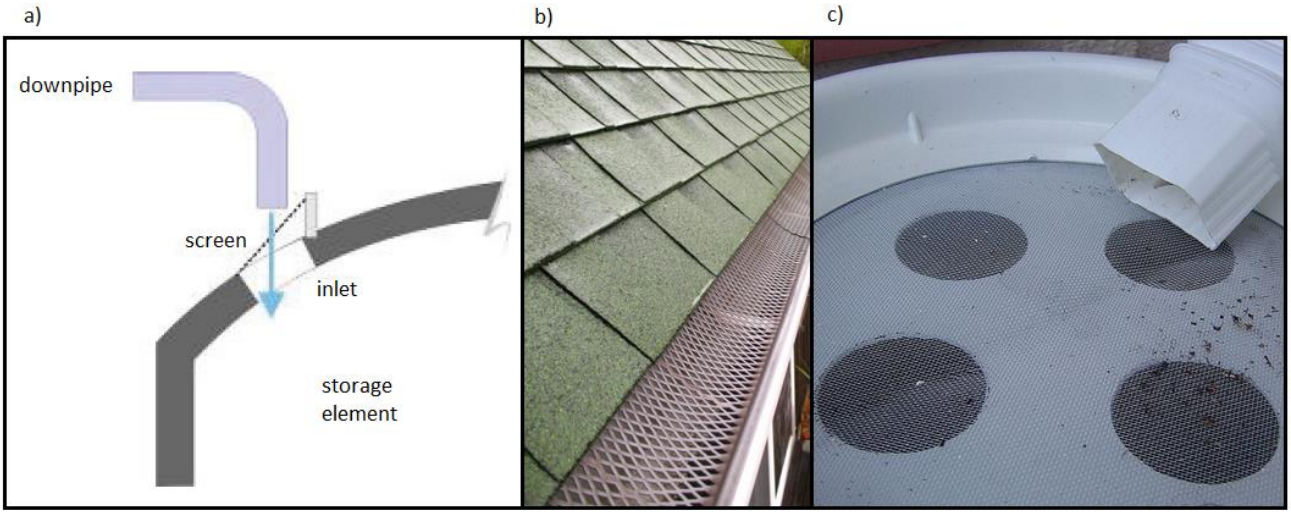


Figura 3-8. a) Esquema de una pantalla/filtro ubicada antes de un elemento de almacenamiento (Fuente: [54]), b) ejemplo típico de una pantalla/filtro de hojas y desechos ubicada en una canaleta[9] y c) ejemplo típico de una pantalla/filtro de desechos y vectores ubicada en el interior de un tanque de retención.[10]

En general, las pantallas evitan que entren nutrientes dentro del sistema de almacenamiento que puedan alimentar bacterias y otro tipo de microorganismos, los cuales si no consiguen suplementos, se empiezan a erradicar en un periodo entre 2 y 20 días. Una pantalla/filtro debe ser durable y fácil de remover y limpiar. Las mayormente empleadas corresponden a aquellas hechas de metal inoxidable o de malla sintética. Igualmente, se han empleado filtros finos para remover los sedimentos más pequeños que pueden generar sedimentación o suspensión dentro del sistema de almacenamiento. También se ha demostrado que remueven efectivamente las bacterias. Son hechos

[9] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://www.finehomebuilding.com/item/13149/simple-screen-gutter-guards-better-than-pro-installed-systems-and-way-cheaper. Consultada el 9 de diciembre del 2013.

[10] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://www.lawrence.com/weblogs/subversive-cultivation/2009/apr/13/rain-barrels/. Consultada el 9 de diciembre del 2013.

de grava, arena y filtros sintéticos. Aun así, para una lluvia tropical los filtros finos no resultan efectivos, pues los caudales en un techo llegan a ser de 1.5 L/s, los cuales impiden el funcionamiento de los mismos.

Desviador de primer lavado (first flush diverter): Tecnología empleada para evitar que el agua lluvia correspondiente al primer lavado entre en el elemento de almacenamiento. Este mecanismo puede reducir efectivamente contaminantes más pequeños y correspondientes al agua del primer lavado, tales como polen, heces, etc.

Los desviadores de primer lavado funcionan al canalizar el primer lavado (el agua que inicialmente escurre por el sistema de transporte) en una bajante adicional, conectada a la bajante principal del sistema de transporte. Allí, queda almacenada el agua correspondiente al primer lavado, y una vez ésta se llene, el agua adicional sigue fluyendo hacia la estructura de almacenamiento. En la parte inferior del desviador, debe existir un grifo o una salida que permita drenar el agua retenida después de cada evento de lluvia. De esta forma, se mejora la calidad del agua almacenada, pues es bien sabido que el agua del primer lavado trae consigo bastantes contaminantes y de un tamaño tal que no son retenidos por las pantallas o filtros. En la Figura 3-9 a) se muestra un esquema general de un desviador de primer lavado junto con sus componentes, y b) un ejemplo típico de este tipo de tecnología aplicado a un caso real.

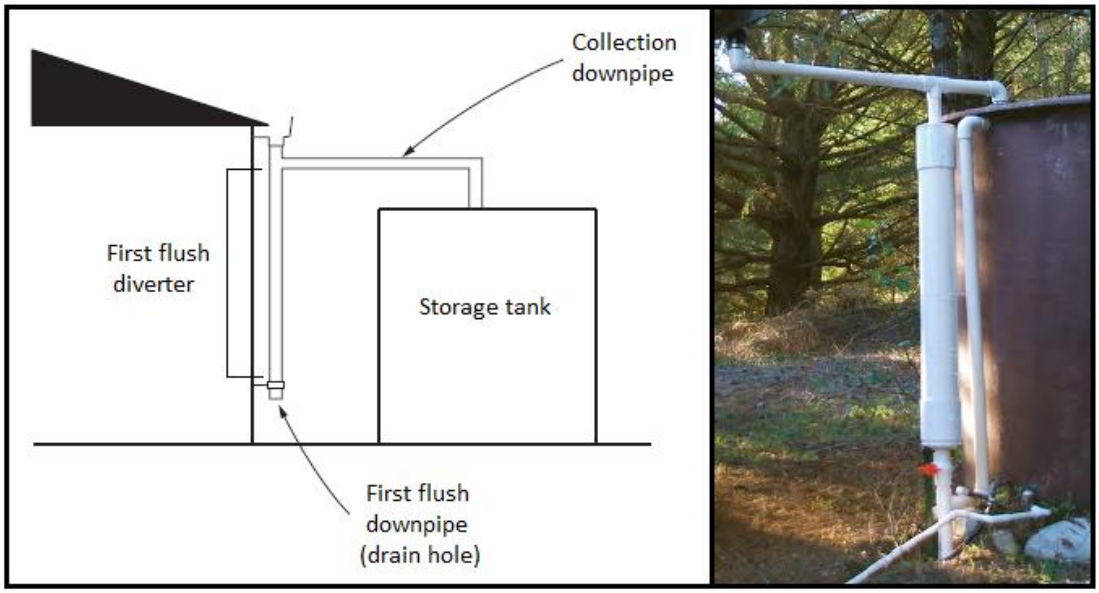


Figura 3-9. a) Esquema general de la ubicación y componentes de un desviador de primer lavado (Adaptada de: [62]), b) ejemplo típico de un desviador de primer lavado (Fuente: [63]).

Diversos diseños y referencias pueden ser encontrados en la literatura acerca de los desviadores de primer lavado, sedimentadores y filtros pre-almacenamiento para sistemas de retención de agua lluvia. Sin embargo, muchos de estos son raramente empleados en la práctica, porque resultan muy difíciles de instalar y/o mantener. Debido a lo anterior, la mayoría de manuales y guías para el almacenamiento de agua lluvia a nivel predial recomiendan básicamente dos desviadores de primer lavado [53, 62]: el de tubo vertical y el de tubo vertical con válvula de bola.

El desviador de primer lavado más sencillo corresponde al de tubo vertical. El desviador (generalmente de 6 a 8 pulgadas de diámetro) se llena inicialmente del agua de primer lavado, para

luego permitir que el agua proveniente del sistema de recolección entre en el tanque de almacenamiento. Usualmente, debe ser drenado después de cada evento de lluvia para evacuar el agua que allí queda, bien sea mediante un grifo o una abertura muy pequeña. El mantenimiento se efectúa al retirar y limpiar el cubrimiento de PVC y debe ser realizado continuamente. En el Capítulo 7 se profundiza más acerca de su operación y mantenimiento.

El desviador de primer lavado de tubo vertical con válvula de bola es una variación del anterior. En esencia funciona bajo el mismo mecanismo, con la diferencia de que en este caso, existe una bola flotante que sella la cámara del primer lavado una vez ésta se encuentre totalmente llena. De esta forma se evita completamente cualquier tipo de mezcla entre el agua que va a ir al almacenamiento y aquella que fue retenida en el primer lavado. Igualmente, debe contener un mecanismo de salida (grifo o abertura) que debe ser operado después de cada evento de lluvia para vaciar la cámara.

En la Figura 3-10 a) y b) se pueden apreciar los esquemas generales de un desviador de primer lavado típico y uno de válvula de bola respectivamente. En la c) se observa un esquema con el funcionamiento de un desviador de primer lavado con válvula de bola, el cual se explicó anteriormente.

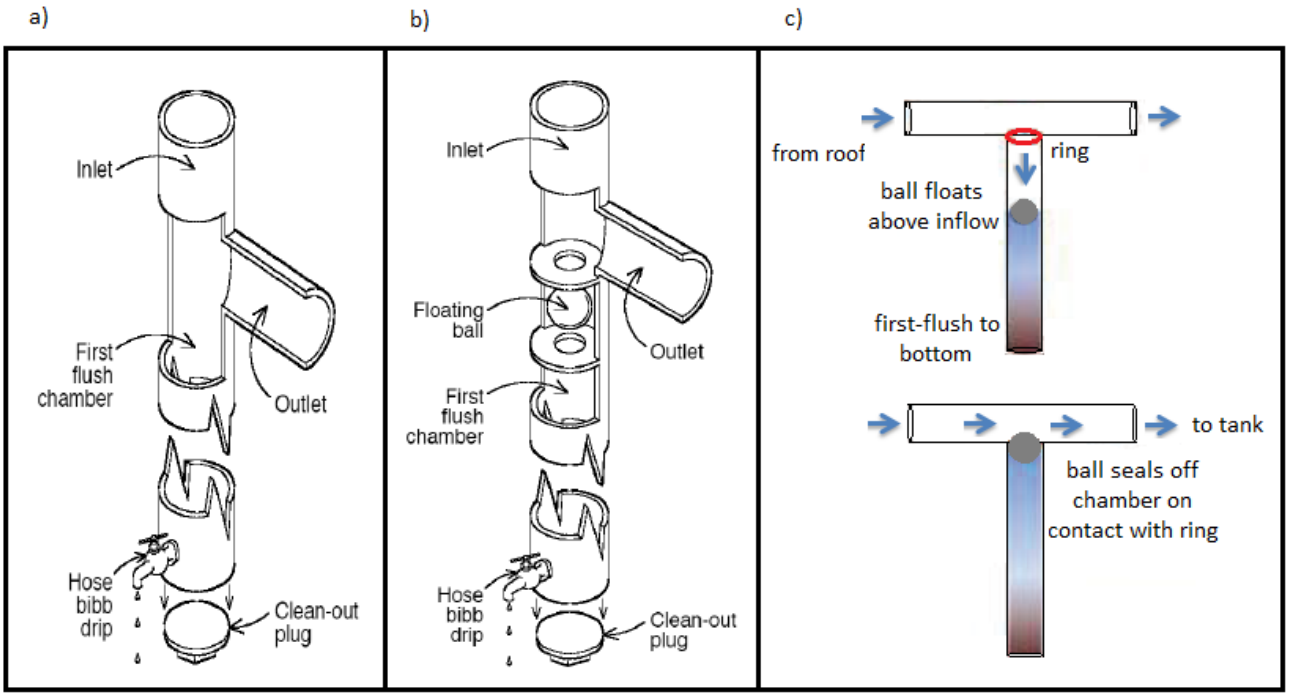


Figura 3-10. a) Desviador de primer lavado de tubo vertical (Fuente: [53]), b) desviador de primer lavado de tubo vertical con válvula de bola (Fuente: [53]), c) esquema del funcionamiento de un desviador de primer lavado de tubo vertical con válvula de bola (Adaptada de: [54]).

La literatura varía en cuanto a la cantidad de agua lluvia a desviar mediante esta estructura. El periodo seco antecedente, la cantidad de desechos y el área de captación son todas variables importantes para conocer este volumen. Existen estudios que afirman que deben desviarse 10 galones de agua lluvia por cada 1,000 pies cuadrados de área de captación, o el equivalente a 38 litros por cada 93 metros cuadrados. Otros indican que éste volumen debe estar entre 13 y 49 galones por cada 1,000 pies cuadrados de techo, o el equivalente entre 50 y 185 litros por cada 93 metros cuadrados.

La principal explicación de por qué existen tantas variaciones con respecto al agua lluvia a desviar, se centra en la cantidad de parámetros que están involucrados y a la complejidad de su estimación [53]. Por ejemplo otros factores importantes para su cálculo serían: intensidad de la lluvia, inclinación del techo, el tiempo entre eventos de lluvia y la naturaleza de los contaminantes y desechos. Es por todo lo anterior que la mayoría de manuales y guías para el almacenamiento del agua lluvia recomiendan desviar entre uno y dos galones por cada 100 pies cuadrados o el equivalente entre 4 y 8 litros por cada 9.3 metros cuadrados de área de captación.

Aun así, es posible calcular el volumen de agua que necesita ser desviado mediante estos mecanismos [62, 54]. Se parte de la premisa de que se necesitan 0.5 mm de lluvia en un área de captación para remover o lavar los desechos y contaminantes del mismo. Igualmente se supone que el área de captación ya fue calculada como se ilustró en el numeral 3.4.1. Entonces, el volumen a desviar se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_d = AC * P_{min}$$

en donde V_d corresponde al volumen a desviar en litros, AC al área de captación en m² y P_{min} a la profundidad mínima para efectuar un lavado de contaminantes en mm. Este último valor se puede adoptar como de 5 mm. Igualmente, es necesario calcular la longitud de la tubería vertical o de la cámara de primer lavado. Para esto, es necesario dividir el volumen a desviar (V_d) entre la sección transversal de dicha cámara o tubería, que se supone como conocida (valor suministrado por el fabricante), u obtenido como se especificó en la Tabla 3-2 si se emplea la misma bajante. De esta forma, la longitud se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_d = \frac{V_d}{0.001 * \pi * r_d^2}$$

en donde L_d corresponde a la longitud de la tubería vertical del desviador en metros, r_d al radio de la tubería, cámara o bajante y 0.001 a un factor de conversión de unidades. La anterior ecuación puede ser útil para determinar la cantidad de cámaras de primer lavado son necesarias en caso de que el volumen de agua a desviar sea mayor para la capacidad de uno solo.

Tanques sedimentadores (baffle tanks o roof washers): Son colocados justo antes de que el agua entre en el sistema de almacenamiento y son empleados para sedimentar y filtrar el material particulado sobrante del agua que viene de las bajantes. Esta tecnología ayuda a que no se genere acumulación de sedimentos en el sistema de almacenamiento principal y son empleadas más que todo en sistemas que requieren de una mayor capacidad de almacenamiento.

En la Figura 3-11 a) se puede apreciar el esquema típico de un tanque sedimentador que se coloca justo antes de la estructura de almacenamiento y b) otro tipo de tanque sedimentador que además filtra el agua antes de que entre al elemento de retención (roof washer).

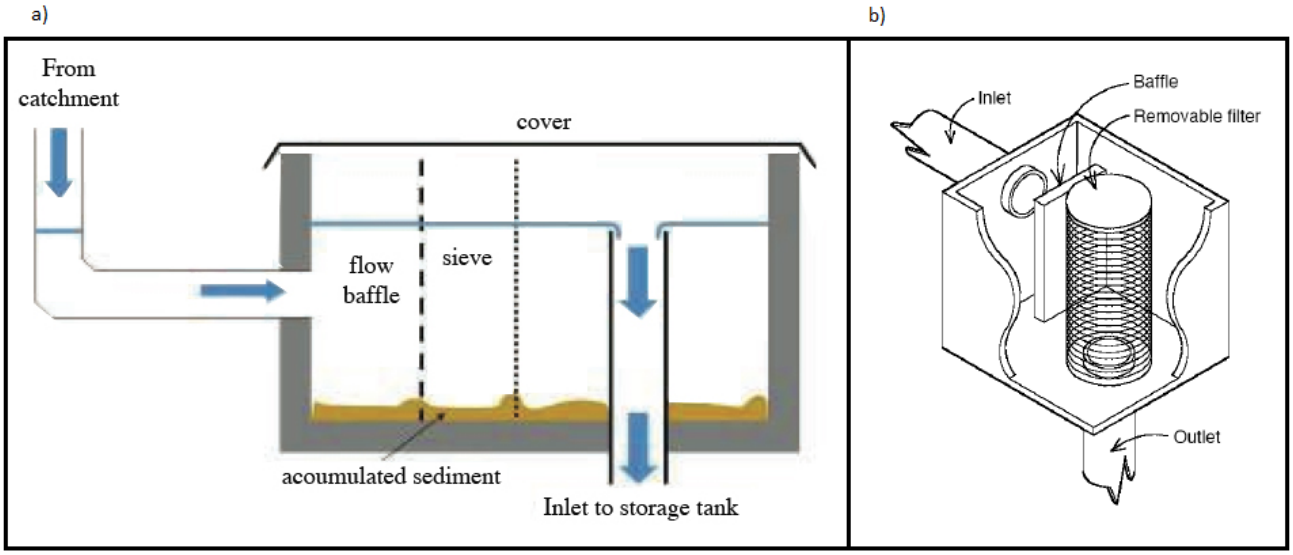


Figura 3-11. a) Esquema típico de un tanque sedimentador colocado antes del elemento de almacenamiento (Fuente: [54]), b) esquema típico de otro tipo de tanque sedimentador empleado (roof washer) que además posee filtro (Fuente: [53]).

Este tipo de tecnologías vienen en su mayoría prefabricadas y por lo general dependen del agua lluvia capturada, la cual a su vez depende del área de captación y régimen de lluvia de la región. Por ejemplo, los tanques sedimentadores anteriores pueden operar para áreas de captación entre los 1,500 y 3,500 pies cuadrados o el equivalente entre 140 y 325 metros cuadrados. Para áreas de captación mayores a estas, se requiere efectuar un diseño propio.

Filtro/sedimentador de vórtice (vortex filter): Empleados para almacenamiento a gran escala, es decir para agua recolectada de grandes áreas de techo. Funcionan como sedimentadores y filtros, son más pequeños que los tanques sedimentadores pero son colocados en conjunto para que su efecto sea mayor.

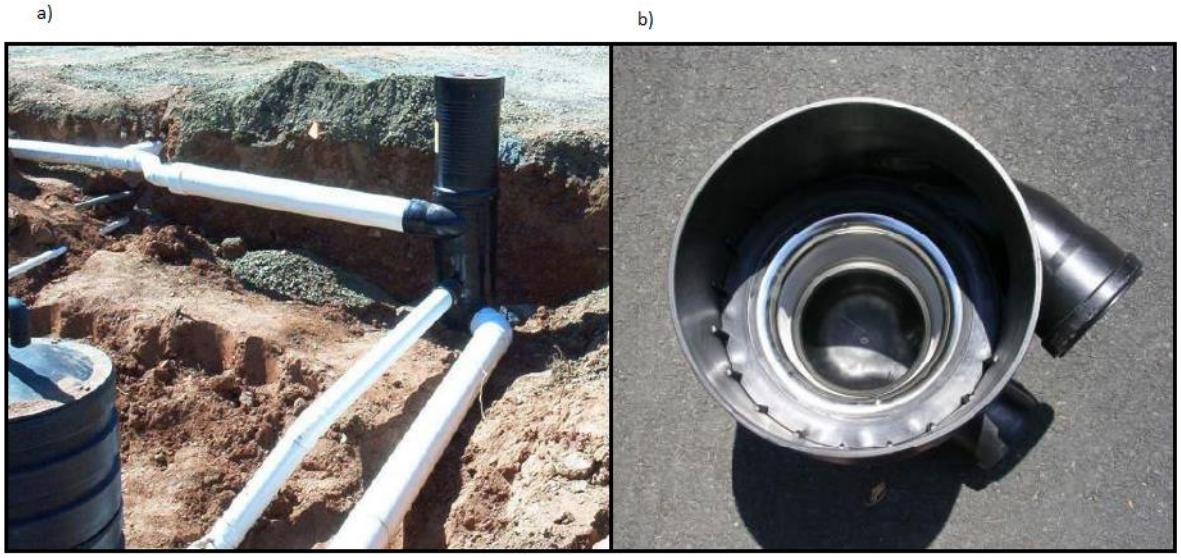


Figura 3-12. a) Instalación típica de un filtro/sedimentador de vórtice (Fuente: [56]), b) interior de un filtro/sedimentador de vórtice (Fuente: [56]).

Al igual que los tanques sedimentadores, este tipo de tecnologías vienen en su mayoría prefabricadas y por lo general dependen del agua lluvia capturada, la cual a su vez depende del área de captación y régimen de lluvia de la región. Son empleados más que todo para almacenamiento subsuperficial mediante celdas. En el Capítulo 6 se profundiza en este tipo de tecnologías.

3.4.3. Sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento corresponde al tanque o cisterna en la cual se va a almacenar el agua lluvia. Puede ser de distintos tamaños, formas, superficiales, subsuperficiales, numeroso, etc. Es en esencia el elemento más importante y costoso de un sistema de recolección y almacenamiento de agua lluvia. Su capacidad puede variar entre los 50 y 100,000 galones. Su tamaño es diseñado teniendo en cuenta la demanda de agua y tratamiento de la escorrentía que se le quiera dar. En el Capítulo 5 se va a profundizar en lo referente a los materiales, tamaños y distintas configuraciones que los tanques o cisternas de almacenamiento pueden tener con sus respectivas ventajas y desventajas. A continuación se van a analizar los criterios de diseño más importantes para cualquier tipo de sistema de almacenamiento de agua lluvia y algunos de sus cálculos.

Los tanques de almacenamiento por lo general son definidos dependiendo de su material, tamaño, localización (superficiales o sub superficiales). Para casos en los cuales se diseña teniendo como prioridad el control de la escorrentía y volúmenes de lluvia, es útil desagregar el volumen total de una estructura de detención en cuatro volúmenes incrementales: volumen muerto, volumen asociado con el de tratamiento (T_V), volumen asociado con la mitigación de inundaciones y alivio al sistema de drenaje, y volumen de desbordamiento. Dichos volúmenes son acomodados y diseñados dependiendo del sitio y del propósito del sistema, pero el volumen total de almacenamiento corresponderá a la suma de todos. A continuación se describe cada uno de ellos [56, 58]:

- Volumen muerto: corresponde al volumen que necesita ser preservado para los sistemas de bombeo, para que éstos puedan funcionar de una manera adecuada y previniendo que operen en seco. El espacio entre dicho nivel y el fondo del tanque determinará el volumen muerto y debe ser tenido en cuenta en el diseño.

- Volumen asociado con el de tratamiento (T_V): corresponde al volumen destinado para el reuso tanto interno como externo. Si no se tiene como propósito el autoabastecimiento de agua, este volumen se juntará con el asociado con la mitigación de inundaciones y alivio del sistema de drenaje. Incluido en el diseño de este volumen, se encuentra el nivel del agua asociado con el inicio de cada evento de lluvia.

- Volumen asociado con la mitigación de inundaciones y alivio al sistema de drenaje: Este volumen es opcional, si se tiene como propósito, además del autoabastecimiento y control de escorrentía, controlar el agua lluvia de exceso para eventos muy intensos o de larga duración. Este volumen se diseña con base en el espacio comprendido entre el pequeño orificio situado debajo del mecanismo de desbordamiento (ver configuración tanque 2) y el orificio destinado al desbordamiento.

- Volumen de desbordamiento: este volumen es empleado para reservar espacio ante los eventos fuertes e intensos de lluvia que van a salir por el mecanismo de desbordamiento, con

el fin de que el sistema no se inunde. Dicho volumen es definido mediante el espacio comprendido entre el orificio de desbordamiento y el tope del tanque. Dentro de este espacio estará comprendido el nivel máximo para la lluvia de diseño del tanque (generalmente con periodo de retorno de 100 años), y el espacio adicional que se tiene en cuenta. La eficiencia de este volumen depende en gran medida del sistema de transporte y recolección y de la eficiencia de las estructuras de limpieza pre almacenamiento.

En la siguiente figura se puede apreciar un esquema que caracteriza los volúmenes incrementales de diseño asociados con el dimensionamiento de la estructura de almacenamiento descritos anteriormente

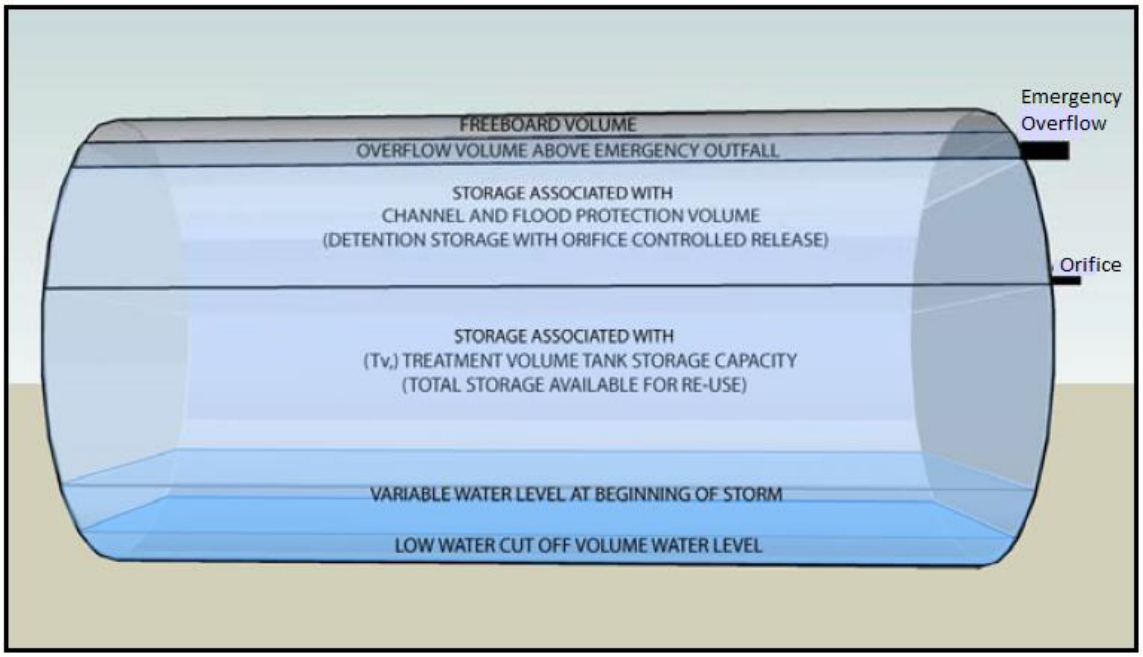


Figura 3-13. Esquema de volúmenes incrementales de diseño asociados al dimensionamiento de la estructura de almacenamiento (Fuente: [58])

El dimensionamiento del elemento de retención depende de diversos factores: régimen de lluvia, el material y área de la captación (techos), la demanda esperada de agua, el costo de construcción/instalación y el grado de eficiencia que se requiera. Un sistema sub dimensionado no va a suplir las demandas requeridas, mientras que un sistema sobre dimensionado puede nunca ser empleado completamente.

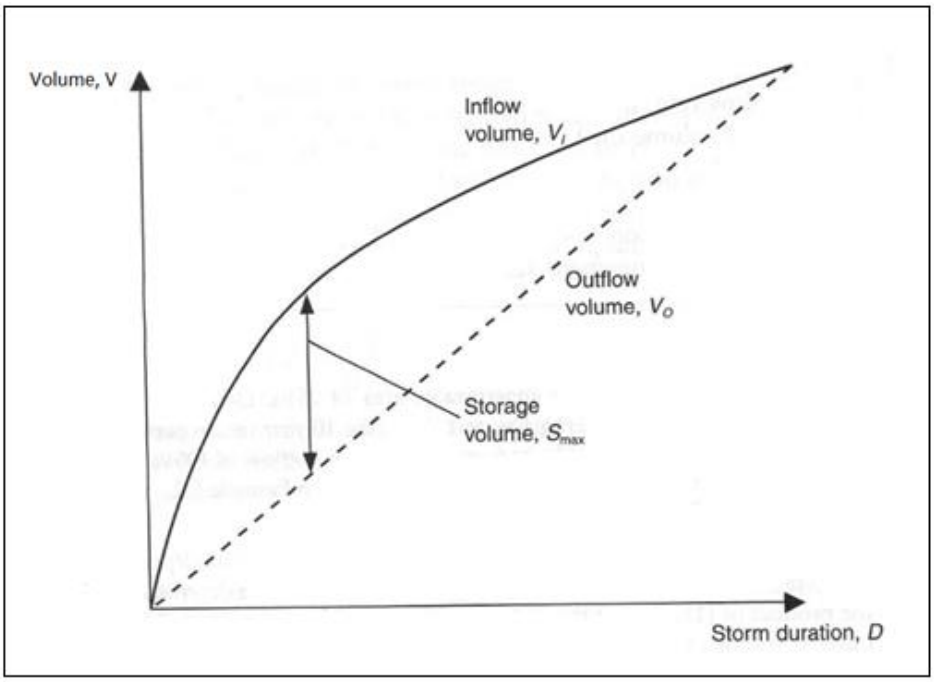
Lo cierto es que los mejores manuales y guías de diseño reportados en la literatura [53, 62, 54] tienen en cuenta la demanda de agua para consumo interno como uno de los parámetros fundamentales para el dimensionamiento del elemento de almacenamiento. En estos, se plantean distintas metodologías para su cálculo: método del periodo seco antecedente, el método simple tabular, el método gráfico, el análisis de curva de masa, análisis adimensional y modelos basados en computador. Aun así, y teniendo en cuenta que para este proyecto de grado la prioridad no es el consumo interno (demanda), ni la elaboración de un procedimiento detallado de diseño, no se va a profundizar mucho en este tema. Si se requiere dimensionar un sistema de retención de agua lluvia para suplir consumo interno

a la vez que reducir volúmenes de escorrentía, se recomienda revisar los manuales referenciados al inicio de este párrafo, al igual que el manual de diseño para sistemas de recolección de agua lluvia [64].

Para propósitos prácticos, y teniendo en cuenta que el elemento de almacenamiento solo se emplea para reducir volúmenes de escorrentía, el dimensionamiento solo tiene en cuenta la tasa de salida y la de entrada para una tormenta de diseño. De acuerdo con lo anterior, el pre dimensionamiento de un sistema de retención de aguas lluvias se puede calcular empleando la siguiente expresión [11]:

$$S = V_I - V_O$$

en donde S es el volumen de almacenamiento en m³, V_I es el volumen total de entrada para una tormenta de diseño en m³ y V_O es el volumen total de salida de la estructura de retención en m³. La siguiente gráfica se muestra el volumen de entrada (V_I) vs. Duración de la lluvia (D) para un periodo de retorno particular. El volumen de salida (V_O) también fue graficado suponiendo una descarga constante. La diferencia entre ambas curvas corresponde al almacenamiento requerido dependiendo de la duración del evento. La diferencia máxima entre las dos curvas corresponde al volumen de almacenamiento requerido para el diseño.



Gráfica 3-1. Volumen de almacenamiento en función de la duración de la lluvia (Fuente: [11])

Por otra parte, en diversos estudios [65, 66, 67, 68], se pueden analizar distintas metodologías para calcular el volumen óptimo que debe poseer un tanque de almacenamiento, dentro de un sistema de retención de agua lluvia a nivel predial, si se tienen en cuenta un gran número de variables desde el régimen de lluvia hasta los costos de construcción y excavación.

3.4.4. Sistema de entrega o distribución

La entrega o distribución corresponde al sistema mediante el cual se va a devolver el agua lluvia al sistema de alcantarillado (control de escorrentía) o mediante el cual se va a reutilizar dentro del predio (reuso). Muchos de los sistemas de entrega requieren de una bomba para poder llevar el agua desde la estructura de almacenamiento hasta su destino final, bien sea para consumo humano, irrigación o para el sistema de drenaje. Igualmente, se debe tener un mecanismo de desbordamiento (overflow mechanism) con el fin de evacuar el agua lluvia de exceso que puede ser retenida en el almacenamiento. Dicho mecanismo consta de tubería(s) conectada(s) al almacenamiento con capacidad mayor o igual que la(s) de entrada. Asimismo, se puede tener un sistema de tratamiento o purificación, el cual corresponde a los filtros y demás tratamientos necesarios en caso de que se requiera emplear el agua para consumo humano.

Recordando que para este proyecto de grado no es prioridad el consumo interno, tan solo se va a tener en cuenta el mecanismo de desbordamiento requerido para evacuar el agua almacenada y devolverla al sistema de drenaje. En la Figura 3-14 se pueden observar distintas configuraciones o distintos tipos del mecanismo de desbordamiento necesario en las estructuras de almacenamiento. En la a) y d) se encuentran la configuraciones más empleadas, en las cuales la salida se encuentra en la parte superior del tanque y es usada una vez el tanque se llena por completo. En ambos casos, el agua que es evacuada del sistema corresponde al agua más limpia dentro del mismo, pues el material particulado y los contaminantes se sedimentan conforma aumenta el tiempo de retención.

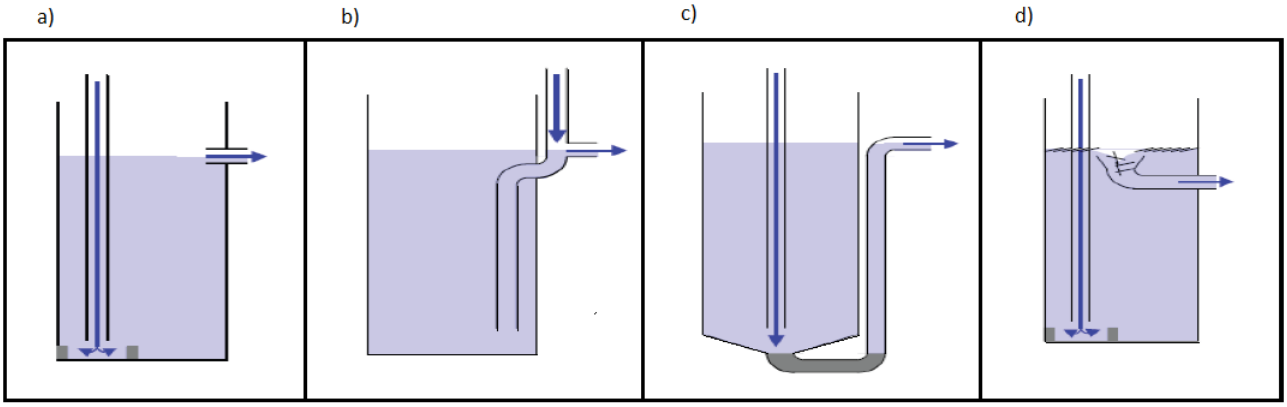


Figura 3-14. Distintas configuraciones del mecanismo de desbordamiento: a) configuración estándar, b) exclusión de entrada, c) salida de fondo y d) acción tipo sifón con limpieza superficial (Fuente: [54])

Las configuraciones b) y c) representan las mejores alternativas en cuanto a la calidad del agua que se queda en el tanque, pues las salidas de agua se hacen directamente del fondo, lugar en el cual se encuentra la mayor cantidad de sedimentos y posibles contaminantes dentro del sistema. Aun así, se recomienda que no se empleen este tipo de configuraciones pues pueden generar represamiento innecesario de agua lo que puede ocasionar crecimiento de bacterias o ineficiencia.

En el Capítulo 4, el Capítulo 5 y el Capítulo 6 se van a analizar las distintas técnicas o tipos de sistemas de almacenamiento más empleados en la actualidad. Se trata del almacenamiento pasivo o barriles de agua lluvia, el almacenamiento activo o cisternas/tanques de retención, y finalmente las nuevas tecnologías que además de almacenar el agua brindan la posibilidad de infiltrarla para reducir más efectivamente los picos de caudal y los volúmenes de escorrentía generados por la urbanización.

4. ALMACENAMIENTO PASIVO (BARRILES DE LLUVIA)

Como se dijo anteriormente, el almacenamiento de aguas lluvias a nivel predial mediante estructuras o tecnologías de retención puede ser de distintas formas: pasivo, activo, superficial y subsuperficial, y puede tener distintos objetivos: para conservación del agua (reutilización), para reducir escorrentía superficial y picos de caudal, o para reducir contaminantes y mejorar la calidad del agua. En esta primera parte se van a analizar las tecnologías de almacenamiento pasivo, tales como los barriles de agua lluvia (rain barrels), los cuales en su mayoría corresponden a retención superficial.

4.1. Descripción General

4.1.1. Características, tipos y componentes

Los sistemas de almacenamiento pasivo son sistemas diseñados para capturar bajos volúmenes de escorrentía de agua lluvia (50-100 galones) que baja a través de los techos de los predios y que puede ser empleada tanto para limpieza e irrigación de jardines, como para reducir los volúmenes de agua que entran al sistema de drenaje [57, 69]. Dentro del almacenamiento pasivo, la tecnología mayormente empleada es el barril de agua lluvia. Los barriles de agua lluvia son comúnmente empleados en residencias en las cuales el agua es fácilmente captada de las bajantes de los techos para ser almacenada. Corresponden a tecnologías de retención costo efectivas, económicas y fáciles de mantener. Operan al retener un predeterminado volumen de escorrentía proveniente de los techos de los predios (proveen almacenamiento permanente para un volumen de diseño), y están equipadas con una tubería que evacúa el agua que supera la capacidad de almacenamiento del barril, y la conduce al sistema de drenaje [48].

Debido a su pequeño tamaño y facilidad de colocación, los sistemas de almacenamiento pasivo deben ser instalados para condiciones de sombra o bajo condiciones bajo las cuales no refleje la luz solar directa o indirectamente en ellos, debido a que ésta actúa como un catalizador para el crecimiento de algas afectando así la funcionalidad del sistema. Inclusive, la gran mayoría de los barriles de agua lluvia son fabricados en colores y materiales opacos precisamente para evitar este problema. Otro aspecto importante a tener en cuenta son los vectores y la posibilidad del crecimiento microbiano en el interior de los sistemas. Para lo anterior, se requieren filtros especiales que no permitan el ingreso de mosquitos a los sistemas de almacenamiento evitando así el crecimiento de estos. Por otro lado, debido a su pequeño volumen de retención y a la falta de tratamiento, el agua almacenada en los barriles nunca es empleada para el consumo humano (inclusive para usos no potables) [57]. En el Capítulo 5 se va a profundizar en los aspectos de instalación, operación y mantenimiento.

Los barriles de agua lluvia vienen en una gran cantidad de tamaños y formas y en países como Estados Unidos y Canadá están disponibles para la compra, e inclusive existen guías para su propia fabricación. En la siguiente imagen se pueden apreciar distintos tipos de barriles y configuraciones existentes. En el esquema a) se ilustra el típico barril de agua lluvia (cilíndrico), mientras que en el esquema c) se muestra un tipo de barril no cilíndrico. Igualmente, para obtener un mayor almacenamiento de agua lluvia, estos sistemas pueden ser puestos en serie, tal y como se muestra en

el esquema b), en el cual existe una conexión entre ambos barriles involucrados lo cual permite almacenar agua en el segundo barril una vez el primero se haya llenado. Se pueden colocar tantos barriles en serie como se quieran, siempre y cuando cada uno cuente con sus elementos esenciales de funcionalidad. Nótese que cada uno de los sistemas pasivos de retención de agua lluvia mostrados están equipados con sus componentes básicos, los cuales se mencionarán a continuación.

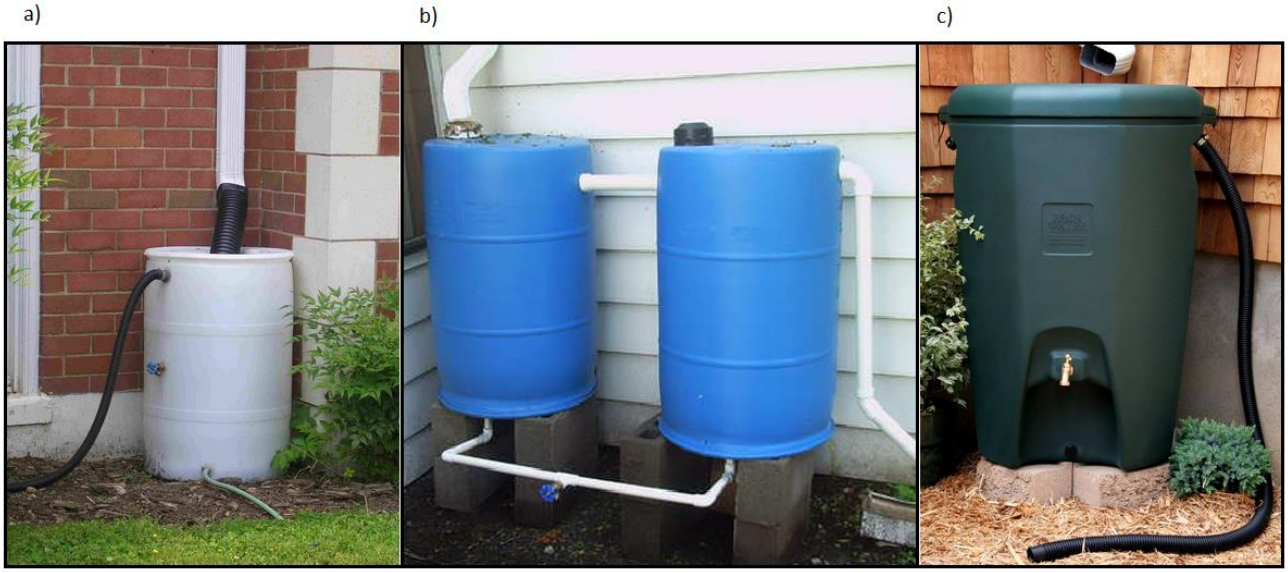


Figura 4-1. Diferentes tipos y configuraciones de sistemas pasivos de almacenamiento de agua lluvia: a) configuración típica de un barril cilíndrico de agua lluvia[11], b) configuración de un sistema de barriles de agua lluvia puestos en serie[12] y c) configuración típica de un barril no cilíndrico de agua lluvia.[13]

Los sistemas de almacenamiento pasivo de agua lluvia constan de los siguientes componentes [70, 71]:

- Área de recolección de agua lluvia (rainwater catchment área): Área en la cual el agua lluvia cae y se convierte en escorrentía que va a ser transportada al almacenamiento. Por lo general corresponde al techo de los predios.

- Canaleta (gutter): Canal pequeño que transporta la escorrentía generada en el área de recolección (techo) hacia la bajante.

- Pantalla de hojas/desechos (leaf/debris screen): Pantalla filtro de aberturas grandes a medianas que se coloca justo antes de la bajante y que evita que allí entren hojas y otros desechos de tamaño considerable.

[11] The City of Windsor (Ontario, Canada) – Rain Barrels. Disponible en línea en: http://www.citywindsor.ca/residents/environment/Environmental-Services/Pages/Rain-Barrels.aspx

[12] Taylor Studios INC – Rain is free. Disponible en línea en: http://www.taylorstudios.com/blog/index.php/2012/04/13/rain-is-free/

[13] Hayneedle – Rain Water Solutions Green Rain Barrel. Disponible en línea en: http://www.hayneedle.com/product/rainwatersolutions65gallongreenrainbarrel.cfm

- Bajante (down spout): Canal pequeño que transporta el agua que llega de la bajante hacia el elemento de almacenamiento.

- Desviador de primer lavado (first flush diverter): Tecnología empleada para evitar que el agua lluvia correspondiente al primer lavado entre en el elemento de almacenamiento. El sistema puede o no tener este componente.

- Pantalla de desechos/vectores (debris/vectors screen): Pantalla filtro de aberturas muy pequeñas que se coloca justo antes del elemento de almacenamiento y que evita que allí entren desechos de menor tamaño y mosquitos.

- Elemento de almacenamiento (storage element): El elemento de almacenamiento es el barril como tal y comúnmente son fabricados en plástico. Aun así, pueden ser de distintos materiales y formas, y tienen una capacidad de retención entre 50 y 100 galones.

- Mecanismo de desbordamiento (overflow mechanism): La capacidad de retención de los elementos de almacenamiento va a ser excedida para eventos considerables de lluvia. Para ello, el mecanismo de desbordamiento debe ser considerado con el fin de evacuar el agua lluvia de exceso que puede ser almacenada en el barril. Dicho mecanismo consiste en una abertura colocada muy cerca de la parte superior del barril, la cual debe ser conectada mediante una manguera o tubería que evacúe el agua bien sea hacia el sistema de drenaje o hacia la superficie (teniendo en cuenta factores de inundación).

- Mecanismo de salida (outlet mechanism): Con el fin de que el elemento de almacenamiento cumpla con su función de controlar el exceso de lluvia, es necesario que éste se evacúe entre eventos de lluvia. Para drenar el barril se emplea el mecanismo de salida, el cual consiste en una abertura colocada muy cerca de la parte inferior del barril, la cual debe ser conectada mediante una manguera o grifo que permita la salida de agua lluvia. El agua que sale por este mecanismo será el agua empleada para lavar carros, irrigar jardines y demás usos que se le quiera dar.

En la imagen a continuación se muestra un esquema típico de un sistema de almacenamiento pasivo de agua lluvia (barril) con cada uno de sus componentes descritos anteriormente.

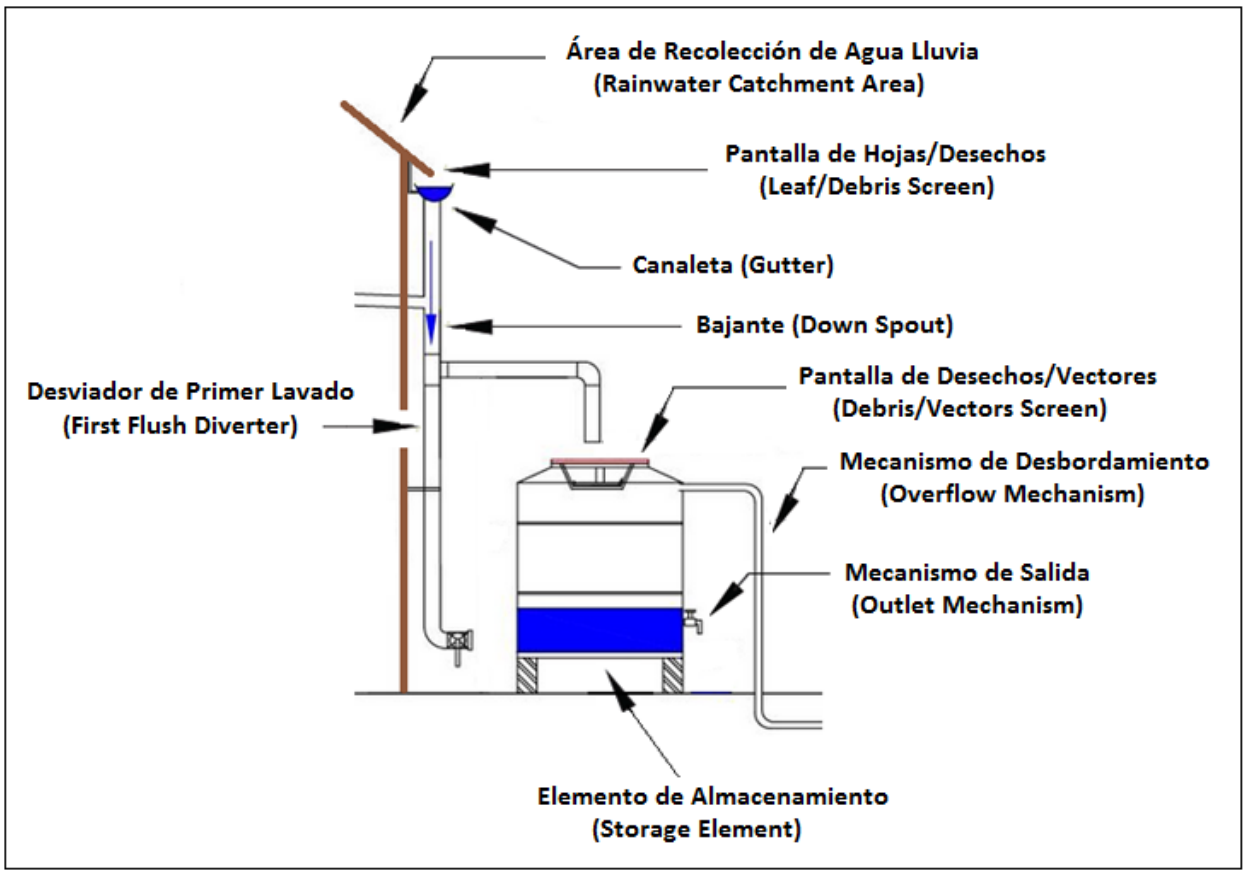


Figura 4-2. Esquema típico de un sistema de almacenamiento pasivo de agua lluvia (barril) con sus componentes. (Adaptada de: [70, 71, 72])

En el Capítulo 7 de este documento (Operación y Mantenimiento) se profundiza en los mecanismos direccionados hacia la adecuada operación y mantenimiento de los sistemas pasivos de retención de agua lluvia tales como los desviadores de primer lavado y los filtros pantalla tanto de hojas, desechos y vectores.

A continuación se mencionan las ventajas y desventajas que presentan este tipo de sistemas.

4.1.2. Ventajas

Las ventajas y/o beneficios que puede generar un sistema pasivo de almacenamiento de agua lluvia son bastantes. A continuación se mencionan algunas de las más importantes [70, 73]:

- Los barriles de almacenamiento corresponden a tecnologías muy económicas para el control de la escorrentía de agua lluvia y pueden ser fácilmente adquiridas o construidas por el dueño de un predio o por una comunidad.

- Muchas de las bajantes están directamente conectadas al sistema de drenaje. Al conectar dichas bajantes a un barril de retención, se puede reducir el volumen de agua lluvia que llega al sistema.

- Se pueden emplear para usos de suelo residencial, comercial, industrial y urbano sin ningún tipo de problema.

- Son sistemas que se operan y mantienen de manera muy sencilla por parte del dueño del predio.

- Constituye una práctica muy eficiente para reciclar el agua y ahorrar dinero del servicio de agua al emplearla en actividades como irrigación de jardines, lavar carros, entre otros.

- No generan mayor impacto visual, y al no ocupar espacio debido a su tamaño, corresponden a tecnologías fácilmente aceptables.

4.1.3. Desventajas

A continuación se mencionan algunas de las desventajas y/o limitaciones que pueden presentar los sistemas pasivos de almacenamiento de agua lluvia [70, 73]:

- Los barriles de retención pueden almacenar relativamente poca cantidad de agua lluvia comparada con la escorrentía que se puede generar de los techos para eventos fuertes o prolongados de lluvia. Para poder contrarrestar este efecto es necesario que se emplee masivamente este tipo de tecnología, o que por el contrario, se complemente con algún otro mecanismo de manejo sostenible de agua lluvia.

- Se debe tener especial cuidado con los materiales con los cuales se fabrican los barriles, pues deben ser lo suficientemente resistentes para soportar las condiciones climáticas y lo suficientemente adecuados para no permitir el crecimiento de algas.

- Durante el invierno intenso, es necesario desinstalar los sistemas de almacenamiento pasivo debido a que el congelamiento hace que su funcionalidad se pierda. Aun así, esta desventaja no debe ser tenida en cuenta para localizaciones ubicadas en y cerca del trópico.

- El crecimiento de insectos y mosquitos puede ser un problema importante (sobre todo en el trópico) si no se tienen en cuenta las medidas preventivas y/o mantenimiento necesario.

- A diferencia de otros sistemas para el manejo de volúmenes de escorrentía, el almacenamiento pasivo no permite la infiltración, ni mejora notablemente la calidad del agua que va a ser retornada al sistema de drenaje.

4.2. Desempeño y Eficiencia

Una vez conocidas las características generales, los componentes y los tipos de sistemas pasivos de almacenamiento de agua lluvia (barriles de lluvia), es necesario analizar el desempeño, la eficiencia y la influencia que estas tecnologías presentan en cuanto a la cantidad y calidad del agua lluvia.

4.2.1. Desempeño en cuanto a la cantidad

A continuación se van a analizar algunos de los estudios más importantes que se han efectuado para cuantificar el desempeño, la eficiencia y la influencia que los sistemas de almacenamiento pasivo generan en cuanto a la cantidad del agua lluvia, es decir, en el alivio de los sistemas de drenaje por atenuación de picos y volúmenes de escorrentía.

En un estudio, Petrucci, et al., 2012 [74], realizan un análisis hidrológico basado en un caso de estudio, en el cual un gran número de tanques de almacenamiento de agua lluvia se instalaron en los predios de una cuenca urbana del este de París. Allí, se lograron instalar tanques en 157 predios de los 450 existentes para un volumen total de almacenamiento de 173 m³ (volumen de cada tanque variaba entre 0.6 y 0.8 m³ lo cual equivaldría a colocar dos barriles de lluvia de 90-100 galones por cada predio). Para realizar el análisis, se llevaron a cabo dos campañas de medición de lluvia-escorrentía, una antes de la instalación de los tanques (2005) y otra después (2008), para así poder determinar la influencia de éstos en la generación de escorrentía. El análisis se efectuó mediante un modelo integrado de luvia-escorrentía y tenía como propósito comprobar si el almacenamiento de agua lluvia a nivel predial aliviaba significativamente el alcantarillado existente para distintos eventos de lluvia. Para comprobar lo anterior, se realizaron análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de los tanques de almacenamiento dependiendo del tipo de lluvia (periodo de retorno). Se simularon dos lluvias, una fuerte y otra suave, y se crearon 4 posibles escenarios de operación de los tanques:

1. Todos los tanques se encontraban llenos. Escenario equivalente a la ausencia de tanques.
2. Todos los tanques se encontraban vacíos. Escenario más favorable para cuantificar efectos.
3. Todos los techos estaban equipados con tanques vacíos. Escenario para cuantificar efecto máximo.
4. Todos los techos estaban equipados con tanques más grandes. Escenario para cuantificar el efecto máximo dado un volumen de almacenamiento mucho mayor por tanque.

Para el caso de la luvia suave, se logró una atenuación importante del pico de caudal de escorrentía mediante la implementación estudiada (es decir escenarios 1 y 2), y pues obviamente mucho mayor para el escenario 3. Por el contrario, cuando la lluvia es fuerte (gran intensidad), se pudo concluir que la lluvia excede la capacidad de almacenamiento de los tanques (para los escenarios 1, 2 y 3). Un así, para el cuarto escenario, la reducción en el pico de caudal de escorrentía corresponde a cerca del 10%, lo cual permitiría el alivio de las estructuras de alcantarillado existente. En la Figura 4-3 a) se pueden apreciar los picos de caudal para un evento de lluvia suave (intensidades entre los 0 y 30 mm/h) y para los tres primeros escenarios. Claramente se observa que el escenario 3 es el que mayor reducción de escorrentía genera, seguido por el 2. . En la Figura 4-3 b) se encuentran los mismos resultados pero para un evento de lluvia fuerte (intensidades entre los 0 y 100 mm/h) y para los

cuatro escenarios. Nótese que para los tres primeros escenarios, la reducción de volúmenes de escorrentía es prácticamente insignificante. Un así, para el cuarto escenario, la reducción en el pico de caudal de escorrentía corresponde a cerca del 10%, como se dijo anteriormente

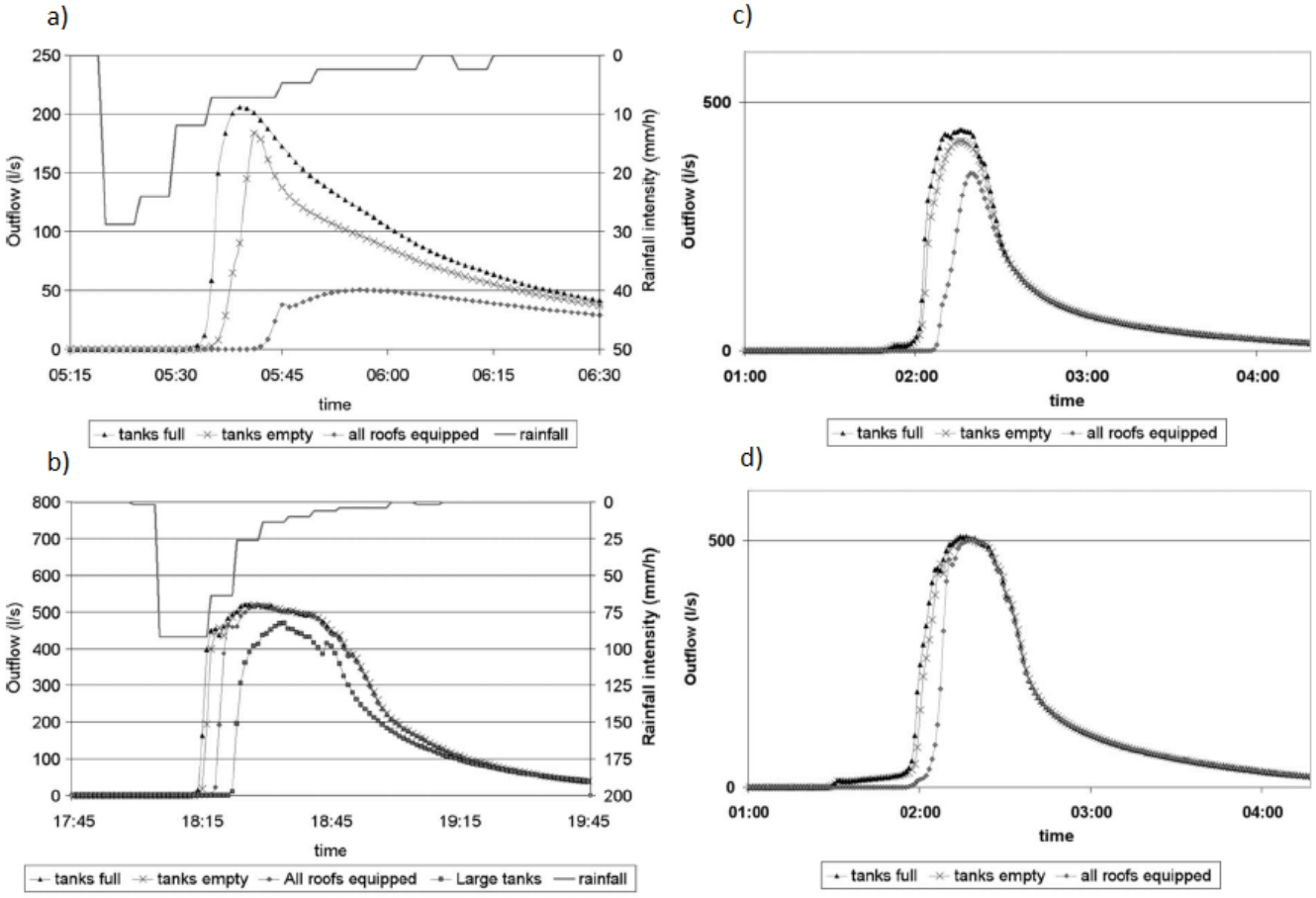


Figura 4-3. Resultados del estudio [74] a) comparación escenarios para un evento de lluvia suave b) comparación de escenarios para un evento de lluvia fuerte. (Fuente: [74])

De acuerdo con lo anterior, se observó que a medida que incrementaba la lluvia, la eficiencia de los barriles de almacenamiento se reducía significativamente. Por esta razón, se se realizó un análisis de sensibilidad para verificar la eficiencia de los tanques de acuerdo con el periodo de retorno de la lluvia. Para ello se ejecutó el modelo para distintos periodos de retorno y se concluyó que efectivamente el desempeño y funcionalidad de los sistemas se veía afectado por la intensidad de la lluvia. Teniendo en cuenta esto, en la Figura 4-3 c) se puede observar el comportamiento del modelo para un periodo de retrno de 2 años. Allí, se alcanza a apreciar una reducción considerable de los volúmenes de escorrentía para el escenario 3 y una reducción más pequeña bajo el escenario 2. En la Figura 4-3 d) se puede observar el comportamiento del modelo para un periodo de retrno de 5 años. Nótese que bajo estas condiciones, ningún escenario alcanza a reducir un volumen de escorrentía considerable.

Por otra parte, "The Milwaukee Metropolitan Sewerage District" (MMSD), condujo un estudio mediante el cual se utilizaron barriles de agua lluvia en el área de drenaje del sistema de alcantarillado combinado de la ciudad de Wisconsin, para evaluar la reducción de la recarga al sistema, producto del almacenamiento de la escorrentía [69]. El estudio supuso 40,000 predios dentro

del área de drenaje del sistema, cada uno con 1,200 pies² de área de techo y con dos barriles de 90 galones puestos en serie almacenando agua proveniente de la mitad del área de techo, es decir, de 600 pies². Se supuso que los dueños de los predios drenaban los barriles después de cada evento de lluvia, y que dicha agua se infiltraba directamente. El estudio mostró que los barriles de agua lluvia no generan impactos considerables en cuanto al volumen de agua lluvia atenuada al sistema de drenaje para lluvias fuertes, pero que por el contrario, pueden reducir los costos de las plantas de tratamiento al reducir considerablemente volúmenes a tratar a mediano-largo plazo. Se concluyó igualmente que para prevenir inundaciones o alivios considerables a los sistemas de drenaje, es necesario incluir otras alternativas para el manejo de la lluvia tales como jardines de infiltración o pavimentos porosos.

Otro estudio analizado [75], intentó evaluar el desempeño de los barriles de agua lluvia y los pavimentos porosos como tecnologías emergentes en dos cuencas urbanas de 70 y 40 km² cerca de Indianapolis, Indiana (USA). Se plantearon 6 posibles escenarios dependiendo de las condiciones y/o combinaciones empleadas y se simularon empleando un marco propuesto para la modelación de los LID y un modelo de impacto hidrológico de largo plazo (L-THIA). Los escenarios modelados fueron los siguientes:

1. Flujo base de la lluvia generada con datos hidrológicos desde 2001 hasta 2010. A partir de este escenario se evaluaron los demás.
2. El 25% de los techos estaban equipados con barriles de agua lluvia.
3. El 50% de los techos estaban equipados con barriles de agua lluvia.
4. El 25% del área impermeable estaba equipada con pavimentos porosos.
5. El 50% del área impermeable estaba equipada con pavimentos porosos.
6. El 25% de los techos estaban equipados con barriles de agua lluvia y el 25% del área impermeable estaba equipada con pavimentos porosos. Escenario resultante de la combinación de los escenarios 2 y 4.

Al correr los escenarios para cada una de las cuencas urbanas, se obtuvo que para la primera, los escenarios 2, 3, 4, 5 y 6 generaron atenuaciones en el volumen de escorrentía del orden del 6%, 11%, 3%, 5% y 8% respectivamente. El escenario que mayor impacto generó en el volumen de la escorrentía (11% de atenuación) fue el 3 (50% de techos equipados con barriles) seguido por el 6 (25% de barriles y 25% de pavimentos porosos) que atenuó cerca del 8% del volumen.

Por el contrario, para la segunda cuenca los escenarios 2, 3, 4, 5 y 6 generaron atenuaciones en el volumen de escorrentía del orden del 3%, 5%, 4%, 8% y 7% respectivamente. El escenario que mayor impacto generó en el volumen de la escorrentía (8% de atenuación) fue el 5 (50% de área impermeable equipada con pavimentos porosos) seguido por el 6 (25% de barriles y 25% de pavimentos porosos) que atenuó cerca del 7% del volumen.

En la Figura 4-4 a) se puede apreciar la comparación de los 6 escenarios simulados para la primera cuenca de drenaje en cuanto a los volúmenes de escorrentía y b) para la segunda cuenca de drenaje. Nótese que se las diferencias expuestas anteriormente quedan en evidencia.

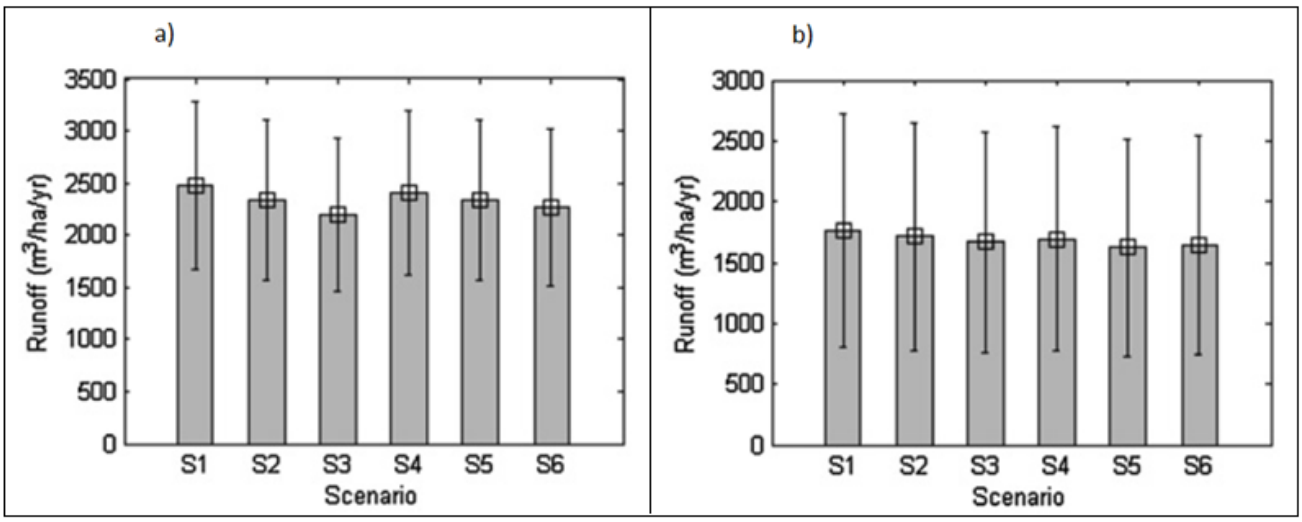


Figura 4-4. Resultados de atenuación de volúmenes de escorrentía estudio [75] a) promedio de volúmenes de escorrentía bajo los 6 escenarios propuestos para la cuenca urbana 1, b) promedio de volúmenes de escorrentía bajo los 6 escenarios propuestos para la cuenca urbana 2 (Fuente: [75]).

Los resultados del estudio indican que para distintos niveles de implementación y cubrimiento de barriles de agua lluvia, se generaron reducciones en los volúmenes de escorrentía que varían entre el 2% y el 12% del total. Por otra parte, la implementación combinada de barriles de agua lluvia junto con pavimentos porosos constituyen una muy buena opción que debe ser tenida en cuenta para el drenaje de cuencas urbanas, pues generan reducciones considerables en los volúmenes de escorrentía.

En otro estudio [76], se realizó un análisis sobre el desempeño proyectado de los sistemas pasivos de almacenamiento de agua lluvia para distintas ciudades de Estados Unidos. En este estudio se demostró que un simple barril de agua lluvia (50 galones) instalado en cada predio de un barrio considerado, puede reducir hasta el 12% del volumen medio anual de agua lluvia para ciudades que se encuentran en regiones semi áridas y que no presentan eventos de lluvia tan intensos o largos. Cuando se trata de un barril con mayor capacidad (100 galones), este valor puede llegar hasta el 14% bajo las mismas condiciones consideradas. Por el contrario, cuando se realiza la simulación bajo el escenario de una región húmeda con eventos de lluvia considerables, esta misma reducción del volumen medio anual de agua lluvia no supera el 4% para barriles sencillos de 50 galones, y llega al 7% para barriles de 100 galones.

En la Figura 4-5 se pueden observar los anteriores resultados mencionados. Nótese que cuando se emplea una cisterna de 500 galones (almacenamiento activo) en vez de los barriles de agua lluvia (almacenamiento pasivo) se generan reducción del volumen medio anual de agua lluvia del 17% para ciudades que se encuentran en regiones semi áridas y del 12% para regiones húmedas.

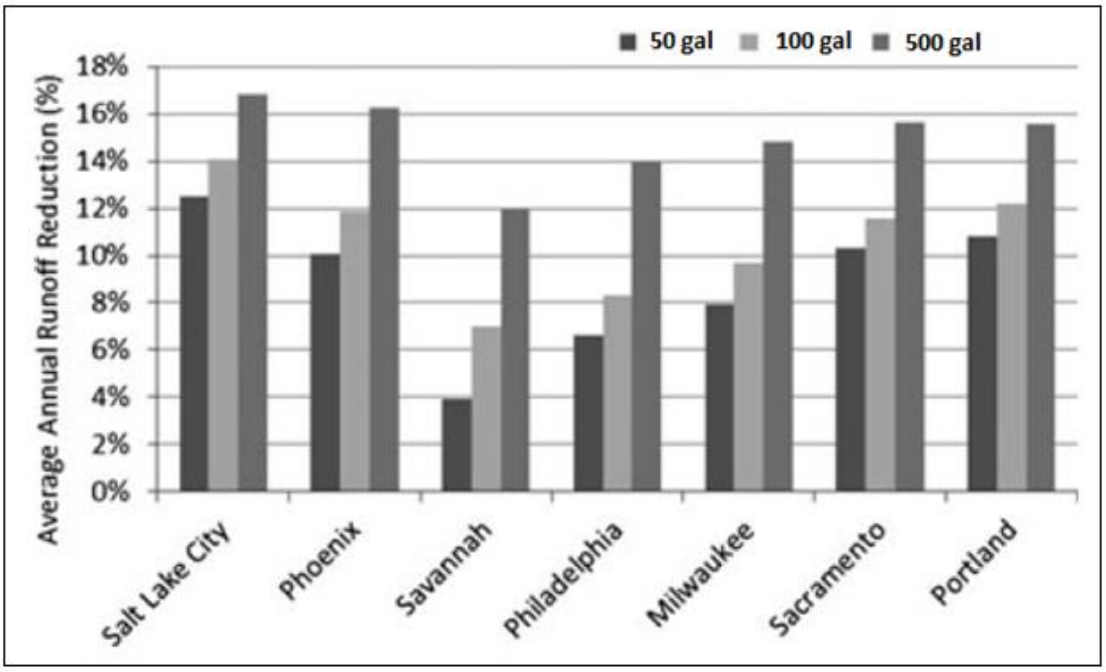


Figura 4-5. Resultados estudio [76]. Reducciones del volumen medio anual de agua lluvia para distintas ciudades de Estados Unidos (Adaptada de: [76]).

Igualmente, en otro estudio realizado [77], se comprueba que el almacenamiento pasivo es mucho más efectivo en la reducción de volúmenes de escorrentía y picos de caudal a medida que la intensidad del evento de lluvia es menor. Los resultados muestran que para eventos de lluvia con periodos de retorno de 100 años, la reducción no alcanza a ser ni del 2%, mientras que para eventos de lluvia con periodos de retorno de 2 años, la reducción puede llegar a alcanzar el 15-20%. Por otra parte, si se combina este tipo de tecnologías con los denominados Best Management Practices (BMP), las reducciones en los volúmenes de escorrentía se vuelven mucho más uniformes para eventos de lluvia con distintos periodos de retorno y pueden llegar a valores cercanos al 40% en promedio. Bajo este último escenario se logra prácticamente la condición hidrológica pre-urbanización.

De acuerdo con los estudios analizados anteriormente, y a algunos otros consultados, se puede concluir lo siguiente acerca del desempeño y eficiencia de los sistemas de almacenamiento pasivo (barriles de lluvia) en cuanto a aspectos de reducción de volúmenes de escorrentía y picos de caudal:

- Un simple barril de agua lluvia (50 galones) instalado en cada predio de una cuenca urbana no genera impactos considerables en cuanto al volumen de agua lluvia atenuada al sistema de drenaje para lluvias fuertes, pues para eventos de lluvia con altos periodos de retorno (100 años) dicha atenuación tan solo alcanza el 2-4% del volumen de escorrentía. Por el contrario, ese mismo barril instalado en cada predio de una cuenca urbana, puede reducir hasta el 12% del volumen medio anual de agua lluvia para eventos con menor periodo de retorno (2 años). Cuando se trata de un barril con mayor capacidad (100 galones), este valor puede llegar hasta el 14% bajo las mismas condiciones consideradas (lluvia con periodo de retorno de 2 años).

- El almacenamiento pasivo es mucho más efectivo en la reducción de volúmenes de escorrentía y picos de caudal a medida que la intensidad del evento de lluvia es menor. A

medida que incrementa la intensidad y duración de la lluvia, la eficiencia de los barriles de almacenamiento se reduce significativamente

- La implementación de barriles de agua lluvia puede resultar ineficiente para eventos fuertes de lluvia, pero por el contrario, y a mediano-largo plazo, pueden reducir los costos de tratamiento de las PTARs, al reducir considerablemente los volúmenes de agua a tratar.

- La implementación combinada de barriles de almacenamiento junto con otras alternativas para el manejo de la lluvia tales como jardines de infiltración o pavimentos porosos, constituyen una muy buena opción que debe ser tenida en cuenta para el drenaje de cuencas urbanas, pues generan reducciones considerables en los volúmenes de escorrentía que llegan a los sistemas de drenaje.

4.2.2. Desempeño en cuanto a la calidad

No es propósito de este documento profundizar demasiado en aspectos de calidad del agua, pero es muy importante mencionar la capacidad que tienen los sistemas de almacenamiento pasivo en cuanto a la reducción de cargas contaminantes y de otro tipo de indicadores de calidad del agua. Es sabido que los barriles de lluvia no generan mayor impacto en cuanto a la atenuación de los volúmenes de escorrentía que llegan a los sistemas de drenaje (2-12%), razón por la cual es de esperarse que tampoco se generen mayores impactos en las reducciones de cargas contaminantes. A continuación se van a analizar un par de estudios que evalúan la eficiencia del almacenamiento pasivo en cuanto a la calidad del agua y se plantean las conclusiones pertinentes.

En uno de los estudios [75] analizados en el numeral 4.2.1, se intentó evaluar igualmente el impacto que generan, en cuanto a la calidad del agua, los barriles de agua lluvia y los pavimentos porosos usados como tecnologías emergentes en dos cuencas urbanas de 70 y 40 km² cerca de Indianapolis, Indiana (USA). Se plantearon 6 posibles escenarios dependiendo de las condiciones y/o combinaciones empleadas y se simularon empleando un marco propuesto para la modelación de los LID y un modelo de impacto hidrológico de largo plazo (L-THIA). Los escenarios modelados fueron los siguientes:

1. Flujo base de la lluvia generada con datos hidrológicos desde 2001 hasta 2010. A partir de este escenario se evaluaron los demás.
2. El 25% de los techos estaban equipados con barriles de agua lluvia.
3. El 50% de los techos estaban equipados con barriles de agua lluvia.
4. El 25% del área impermeable estaba equipada con pavimentos porosos.
5. El 50% del área impermeable estaba equipada con pavimentos porosos.
6. El 25% de los techos estaban equipados con barriles de agua lluvia y el 25% del área impermeable estaba equipada con pavimentos porosos. Escenario resultante de la combinación de los escenarios 2 y 4.

Al correr los escenarios para cada una de las 2 cuencas urbanas, se obtuvo que para la primera, los escenarios 2, 3, 4, 5 y 6 generaron atenuaciones en las cargas de fósforo total (TP) del orden del 5%, 11%, 3%, 5% y 8% respectivamente, al igual que de las cargas de nitrógeno total (TN) del orden de 6%, 12%, 3%, 6% y 9% respectivamente. El escenario que mayor impacto generó en cuanto a la

reducción de cargas contaminantes (11% de atenuación de TP y 12% de atenuación de TN) fue el 3 (50% de techos equipados con barriles) seguido por el 6 (25% de barriles y 25% de pavimentos porosos) que atenuó cerca del 8% de la carga del TP y del 9% de la carga del TN.

Por el contrario, para la segunda cuenca , los escenarios 2, 3, 4, 5 y 6 generaron atenuaciones en las cargas de fósforo total (TP) del orden del 2%, 5%, 4%, 7% y 6% respectivamente, al igual que de las cargas de nitrógeno total (TN) del orden de 3%, 6%, 4%, 8% y 7% respectivamente. El escenario que mayor impacto generó en cuanto a la reducción de cargas contaminantes (7% de atenuación de TP y 8% de atenuación de TN) fue el 5 (50% de área impermeable equipada con pavimentos porosos) seguido por el 6 (25% de barriles y 25% de pavimentos porosos) que atenuó cerca del 6% de la carga del TP y del 7% de la carga del TN.

En la Figura 4-6 a) se puede apreciar la comparación de los 6 escenarios simulados para la primera cuenca de drenaje en cuanto a los parámetros de calidad del agua (TP y TN) y b) para la segunda cuenca de drenaje. Nótese que se las diferencias expuestas anteriormente quedan en evidencia.

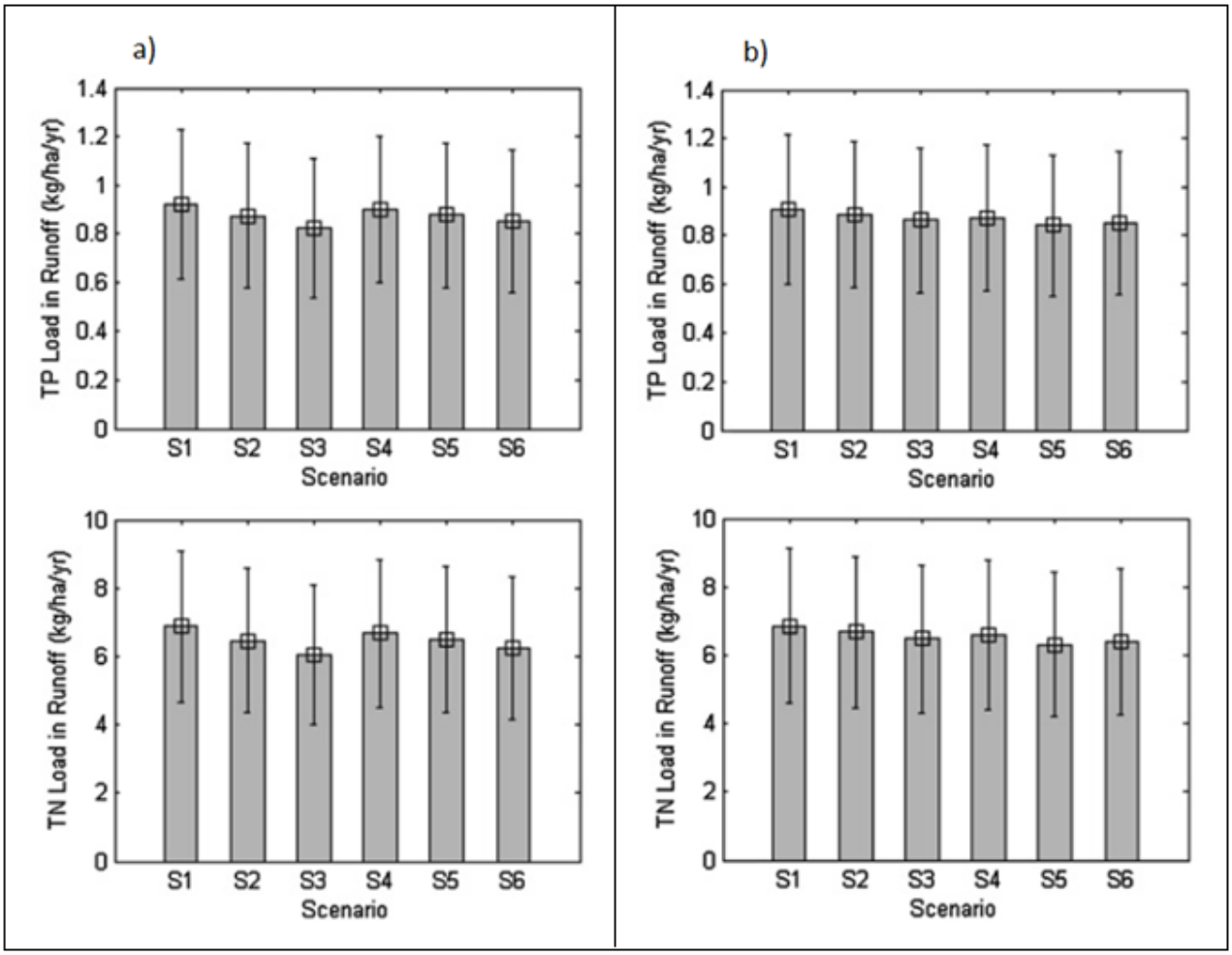


Figura 4-6. Resultados de calidad del agua estudio [75] a) promedio de cargas anuales por hectárea de TP y TN bajo los 6 escenarios propuestos para la cuenca urbana 1, b) promedio de cargas anuales por hectárea de TP y TN bajo los 6 escenarios propuestos para la cuenca urbana 2 (Fuente: [75]).

Los resultados del estudio indican que para distintos niveles de implementación y cubrimiento de barriles de agua lluvia, se generaron reducciones en las cargas contaminantes de fósforo total (TP) y de nitrógeno total (TN) que varían entre el 2% y el 12% del total. Por otra parte, la implementación combinada de barriles de agua lluvia junto con pavimentos porosos constituyen una muy buena opción que debe ser tenida en cuenta para mejorar la calidad del agua de la escorrentía urbana.

Por otra parte, según [69], el agua almacenada en un barril de agua lluvia puede constituir en una fuente de agua limpia, segura y confiable siempre y cuando el sistema de recolección y transporte se encuentre debidamente construido y mantenido. Es por esto que se deben seguir las siguientes indicaciones para garantizar una buena calidad del agua contenida dentro del barril: los materiales de construcción de los techos no deben contener asbesto, las canaletas de recolección no deben contener pintura o soldadura expuesta y se deben mantener periódicamente. Igualmente, y dependiendo del lugar, se debe tener especial cuidado con el depósito seco de contaminantes del aire. El uso que se le da al agua almacenada en los barriles (lavandería e irrigación) no requiere parámetros estrictos de calidad, y por lo tanto no debe existir gran preocupación al respecto, a menos que se le quiera dar otro tipo de consumo (potable), y en dado caso deberán existir estructuras de filtración y desinfección. En el Capítulo 7 se profundiza acerca de la operación y mantenimiento de este tipo de tecnologías.

De acuerdo con los estudios analizados anteriormente, y a algunos otros consultados, se puede concluir lo siguiente acerca del desempeño y eficiencia de los sistemas de almacenamiento pasivo (barriles de lluvia) en cuanto a aspectos de calidad del agua:

- Un simple barril de agua lluvia (50 galones) instalado en cada predio de una cuenca urbana puede generar reducciones en las cargas contaminantes de fósforo total (TP) y de nitrógeno total (TN) que varían entre el 2% y el 12% del total de la carga.

- El almacenamiento pasivo es mucho más efectivo en la reducción de cargas contaminantes (TP y TN) a medida que la intensidad del evento de lluvia es menor. A medida que incrementa la intensidad y duración de la lluvia, la eficiencia de los barriles de almacenamiento se reduce significativamente en cuanto a esta problemática.

- La implementación combinada de barriles de agua lluvia junto con pavimentos porosos constituyen una muy buena opción que debe ser tenida en cuenta para mejorar la calidad del agua de la escorrentía urbana.

- El agua almacenada en un barril de agua lluvia puede constituir en una fuente de agua limpia, segura y confiable siempre y cuando el sistema de recolección y transporte se encuentre debidamente construido y mantenido. Por otro lado, el uso que se le da al agua almacenada en los barriles (lavandería e irrigación) no requiere parámetros estrictos de calidad, y por lo tanto no debe existir gran preocupación al respecto, a menos que se le quiera dar otro tipo de consumo (potable), y en dado caso deberán existir estructuras de filtración y desinfección.

5. ALMACENAMIENTO ACTIVO (TANQUES Y CISTERNAS)

En este Capítulo se van a analizar las tecnologías de almacenamiento activo, tales como las cisternas y tanques de agua lluvia, los cuales pueden corresponder a retención superficial, subsuperficial y pueden ser de distintos tamaños, materiales y configuraciones.

5.1. Descripción General

5.1.1. Características, tipos y componentes

Los sistemas de almacenamiento activo son sistemas diseñados para capturar altos volúmenes de escorrentía de agua lluvia (1,000 a 100,000 galones) que baja a través de los techos de los predios y de otras superficies tales como terrazas, andenes, zonas verdes e inclusive áreas de parqueo si se tienen en cuenta las medidas necesarias de pre tratamiento [57]. Dichos sistemas además de controlar la escorrentía, tienen la habilidad de tratar el agua almacenada y pueden tener la opción de contar con un sistema posterior de abastecimiento hacia el interior de los predios. Pueden ser fabricados en madera, plástico, metal o concreto dependiendo del tamaño requerido y de la posible ubicación. Igualmente pueden ser instaladas debajo de la superficie del terreno (subsuperficiales) o pueden ser colocadas superficialmente, y para tal caso, requieren las mismas especificaciones técnicas que los barriles de agua lluvia para evitar crecimiento de algas y de mosquitos.

La implementación de este tipo de tecnologías, usualmente requiere de un gran esfuerzo de diseño para: 1) determinar el volumen óptimo de almacenamiento dependiendo del agua recolectada y la demanda de la misma (ver numeral 4.4.3), 2) identificar las posibles ubicaciones (ver numeral 4.3.1), 3) dimensionar el sistema de tuberías necesario para drenar el agua de almacenamiento, 4) incorporar un sistema posterior de tratamiento del agua y 5) configurar un sistema de distribución adecuado para suplir la demanda interna y externa [57]. Para el caso de este documento, solo interesan los 3 primeros numerales anteriores, pues no es propósito del mismo profundizar en aspectos de tratamiento y autoabastecimiento del agua.

Actualmente, existe controversia acerca de cuál tipo de cisterna o tanque es mejor adoptar, pues estos pueden ser superficiales o sub superficiales y de distintos materiales y formas. Construir un tanque debajo del suelo ha resultado ser un método popular y costo eficiente. Problemas asociados con la cimentación pueden aflorar, pero siempre y cuando se apoye el tanque sobre el estrato adecuado, pueden ser instalados con relativa facilidad. Por otra parte pueden resultar afectados debido a ciertas cargas superficiales, y pueden ser más difíciles de operar y mantener. En la siguiente tabla, se resumen las ventajas y desventajas de emplear un sistema superficial vs uno sub superficial reportadas en la literatura consultada [54, 62, 56]:

Tabla 5-1. Ventajas y desventajas de los sistemas de almacenamiento activo superficiales vs. sub superficiales (Adaptada de: [54, 62])

Tipo de Almacenamiento	Ventajas	Desventajas
Superficial	Permite una fácil inspección de fugas y grietas	Requiere del espacio suficiente y adecuado
	La extracción de agua puede ser por gravedad mediante salida por grifo lo cual permite su completo drenaje muy fácilmente	Se daña mucho más fácilmente , pues está expuesto a las condiciones climáticas
	Es mucho más barato de operar y mantener particularmente almacenamientos pequeños	Generalmente su construcción es más costosa y requiere de una cimentación adecuada
	Puede ser colocada en elevación para incrementar la presión del agua y reducir costos de bombeo	Si llega a colapsar o fallar, puede resultar muy peligroso
		Deben ser construidos de materiales opacos y muy resistentes
Sub superficial	El suelo alrededor le brinda estabilidad estructural y por lo tanto sus paredes y fondo pueden ser más delgadas (más barato de construir)	Para volúmenes pequeños puede resultar mucho más costoso de construir
	Requiere de nada o de muy poco espacio superficial. Ideal para almacenamientos grandes	La extracción de agua puede resultar más problemática y costosa al requerir sistema de bombeo
	Puede ser parte de la cimentación del establecimiento	Fugas y grietas son mucho más difíciles de detectar y corregir. Pueden resultar una amenaza para la estabilidad del establecimiento o del terreno
		Posible contaminación del tanque debido a intrusiones subterráneas o agua de inundación
		Posibilidad de una falla causada por raíces de árboles o cualquier otra interferencia subterránea existente
		No se puede drenar completamente de forma fácil

De igual forma, los sistemas activos de almacenamiento pueden ser fabricados de diversos materiales dentro de los cuales los más comunes son los de fibra de vidrio, polietileno o plástico, acero galvanizado o metal, concreto y madera. A continuación se mencionan las características más importantes, sus ventajas, desventajas y la expectativa de vida útil para cada uno de estos.

Fibra de vidrio: Son muy populares en algunos lugares del mundo y tienen la ventaja de que son muy livianos, fáciles de transportar, con una vida útil prolongada y fácilmente reparables. Aun así, pueden resultar costosos si se compara con otro tipo de material empleado para la fabricación de tanques y cisternas. Pueden tener problemas con el crecimiento de bacterias y algas en climas

tropicales debido a mayor facilidad de penetración de la luz solar. Típicamente, tienen una capacidad máxima de almacenamiento de entre 20 y 50 m³ (hasta 15,000 galones) y tienen una vida útil de mínimo 25 años.

Plásticos (polietileno): Este tipo de tanques se han venido volviendo populares alrededor del mundo en los últimos años. Son muy fáciles de instalar, y resultan más durables que otros materiales pues tienen mayor tecnología anti rayos UV. Son muy fáciles de transportar debido a que son muy livianos y flexibles. Aun así, los tanques plásticos no son tan durables como otros y pueden resultar más costosos. Típicamente, tienen una capacidad máxima de almacenamiento de entre 25 y 35 m³ (hasta 10,000 galones) y tienen una vida útil entre 15 y 25 años.

Metal (acero galvanizado): Los tanques del metal (acero galvanizado) son usualmente prefabricados y livianos, razones por las cuales resultan fáciles de instalar y transportar. Su popularidad se ha ido disminuyendo debido a su corta durabilidad, la cual depende de tres factores importantes: 1) la calidad y grosor del metal empleado para su fabricación, 2) el nivel de protección suministrado al tanque, y 3) la calidad de la instalación y el nivel de exposición a condiciones ambientales ácidas o salinas. Resulta una muy buena opción para localizaciones urbanas alejadas de la costa, pues de esta forma se evitan condiciones ácidas o salinas que causen la corrosión del metal. Su capacidad de almacenamiento es menor que la de tanques hechos de otros materiales con valores máximos hasta de 10 m³ (2,500 galones) y tienen una vida útil promedio entre 5 y 8 años.

Concreto: Los tanques de concreto pueden ser construidos in-situ o bien pueden ser prefabricados. Igualmente pueden ser superficiales o sub superficiales. Tanques de concreto reforzado bien construidos son los más durables y pueden ser de cualquier tipo de tamaño. La desventaja es que resultan muy costosos, debido a no solo el costo de los materiales necesarios para el concreto como tal, sino al proceso de diseño y construcción de los mismos. Otro problema es que se pueden generar grietas o fisuras, especialmente en tanques subsuperficiales y que pueden resultar difíciles de reparar. Típicamente, tienen una capacidad máxima de almacenamiento de hasta 35 m³ (hasta 10,000 galones) y tienen una vida útil mayor a los 50 años.

Madera: En cuanto a aspectos estéticos, los tanques de almacenamiento hechos en madera constituyen la opción más atractiva. Tienen una gran vida útil si son adecuadamente mantenidos y pueden ser muy extensos y de gran capacidad. Aun así, resulta la opción más costosa debido al material con el cual se construye y a la mano de obra especializada que se requiere para su construcción in-situ. Típicamente, tienen una capacidad máxima de almacenamiento entre 100 y 140 m³ (hasta 37,000 galones) y tienen una vida útil mayor a los 80 años.

En la Figura 5-1 se pueden apreciar diferentes tipos de tanques hechos de distintos materiales y colocados superficial y sub superficialmente. En el esquema a) se muestra una serie de tanques hechos en fibra de vidrio, colocados sub superficialmente diseñados para almacenar una gran cantidad de agua lluvia. En el esquema b) se pueden apreciar dos tanques en paralelo hechos de plástico (polietileno), subsuperficiales y diseñados para captar el agua lluvia muy seguramente de un establecimiento comercial, institucional o residencial de gran área de captación. En la c) se observa un tanque colocado superficialmente fabricado de acero galvanizado de mucha menor capacidad. Finalmente en la imagen d) se puede ver un tanque superficial fabricado en madera y de gran capacidad de almacenamiento muy seguramente para uso rural.

Figura 5-1. Diferentes tipos y configuraciones de sistemas activos de almacenamiento de agua lluvia: a) serie de tanques sub superficiales hechos en fibra de vidrio (Fuente: [56]), b) dos tanques subsuperficiales de plástico colocados en paralelo (Fuente: [56]), c) tanque superficial construido en acero galvanizado de menor capacidad (Fuente: [53]) y d) taque superficial construido en madera de gran capacidad y de uso rural (Fuente: [53]).

En la Figura 5-2, se puede apreciar un esquema típico de un sistema de almacenamiento activo de agua lluvia con sus componentes. Básicamente, este tipo de sistemas tienen los mismos elementos a los descritos en el numeral 3.2, es decir área de captación, sistema de transporte/recolección, sistema de almacenamiento y sistema de entrega/distribución.

El elemento 1) del esquema, corresponde al área de captación y sistema de transporte/recolección, es decir corresponde al área de drenaje, a las canaletas, bajantes, filtros pantallas de desechos y hojas, y al mecanismo de primer lavado (aunque este último es opcional). Los elementos 2) y 3) corresponden al mecanismo de pre-tratamiento necesario y obligatorio de instalar para el almacenamiento activo, pues de esta forma se garantiza la eficiencia y funcionamiento del sistema. El elemento 4) es opcional y consiste en un dispositivo que hace que se elimine la turbulencia dentro de la retención con el fin de mejorar las condiciones hidráulicas tanto de entrada como de salida. La estructura 5) corresponde al elemento de almacenamiento, bien sea cisterna, tanque, superficial, sub superficial y/o de cualquier tipo de material (simplemente es un esquema representativo). Y finalmente, el elemento 6) es el mecanismo de desbordamiento que ya se analizó en capítulos anteriores. Las características detalladas y las consideraciones de diseño de cada uno de estos elementos se analizaron en los numerales 3.2 y 3.4.

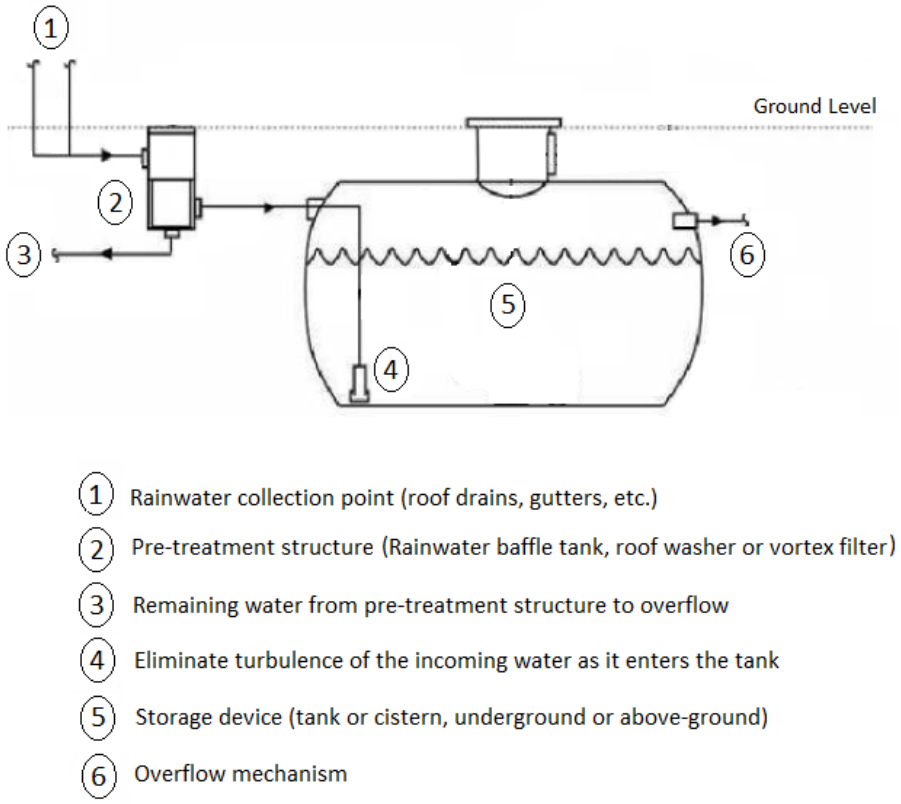


Figura 5-2. Esquema típico de un sistema de almacenamiento activo de agua lluvia (cisterna o tanque) con sus componentes básicos (Adaptada de: [56])

A diferencia del almacenamiento pasivo, un buen diseño de un sistema activo de retención de agua lluvia puede proveer una mayor flexibilidad para el manejo de la escorrentía debido a que estos se diseñan de acuerdo con las características de la lluvia y la demanda del sitio en el cual se instalan. El dimensionamiento del sistema requiere de un mayor detalle y con variables como el área de captación, los patrones de lluvia de la región y las demandas establecidas tanto para consumo interno como para externo. Muchos artículos y literatura consultada recomiendan el uso de un registro mensual de la precipitación para realizar el dimensionamiento; sin embargo, los registros diarios y/o horarios representan una mejor alternativa para poder caracterizar mejor la variabilidad espacial y temporal de la misma [57].

En el Capítulo 7 de este documento (Instalación, Operación y Mantenimiento) se profundiza en los mecanismos direccionados hacia la adecuada operación y mantenimiento de los sistemas activos de retención de agua lluvia tales como los filtros pantalla tanto de hojas, desechos y vectores, y las estructuras de pre tratamiento (desviadores de primer lavado, tanques sedimentadores y filtros de vórtice).

A continuación se mencionan las ventajas y desventajas que presentan este tipo de sistemas.

5.1.2. Ventajas

Las ventajas y/o beneficios que puede generar un sistema activo de almacenamiento de agua lluvia son bastantes. A continuación se mencionan algunas de las más importantes [54, 55]:

- Tienen la capacidad de proveer agua en o cerca del sitio donde se necesita o es usada, evitando así la necesidad de tener sistemas de distribución.

- Se pueden emplear superficialmente, sub superficialmente y para usos de suelo residencial, comercial, industrial y urbano sin ningún tipo de problema.

- Reducen más eficientemente los volúmenes de escorrentía y las cargas de contaminantes que entran al sistema de drenaje reduciendo así los picos de caudal en eventos fuertes de lluvia y mejorando la calidad del agua.

- Pueden proveer de agua a la población en casos de emergencia o cuando se generen cortes del servicio de agua.

- Pueden constituir en una alternativa muy eficiente para el manejo del agua lluvia urbana para condiciones en donde evitar el empleo de superficies impermeables es imposible o el espacio es insuficiente (áreas altamente urbanizadas).

- La construcción de un sistema de almacenamiento activo de agua lluvia es relativamente sencillo y puede cumplir casi cualquier requerimiento.

- Este tipo de almacenamiento reduce la erosión urbana.

- Ayudan a reducir el pico de demanda en verano y por consiguiente retardan las expansiones de plantas de tratamiento existentes.

5.1.3. Desventajas

A continuación se mencionan algunas de las desventajas y/o limitaciones que pueden presentar los sistemas activos de almacenamiento de agua lluvia [54, 55]:

- Un sistema activo de almacenamiento de agua lluvia con baja capacidad, limita la cantidad de agua lluvia que puede ser retenida y por lo tanto para periodos de sequía prolongados, no representa una tecnología confiable. Incrementar la capacidad de almacenamiento, aumenta los costos lo cual puede generar problemas en comunidades de bajos ingresos.

- Las cisternas o tanques de retención pueden almacenar relativamente poca cantidad de agua lluvia comparada con la escorrentía que se puede generar de los techos de una población para eventos fuertes o prolongados de lluvia. Para poder contrarrestar este efecto es necesario que se emplee masivamente este tipo de tecnología, o que por el contrario, se complemente con algún otro mecanismo de manejo sostenible de agua lluvia.

- La capacidad de almacenamiento de estos sistemas necesita estar disponible para cuando se presenta un evento de lluvia, y por esto, muchos de estos pueden resultar ineficientes para temporadas muy lluviosas o para situaciones en las cuales no sean fáciles de vaciar completamente.

- Se debe tener especial cuidado con los materiales con los cuales se fabrica este tipo de sistemas, pues deben ser lo suficientemente resistentes para soportar las condiciones climáticas y lo suficientemente adecuados para no alterar la estabilidad del suelo y cumplir con la vida útil propuesta.

- Existe un gran número de consideraciones a la hora de ubicar un sistema de almacenamiento activo de agua lluvia, razón por la cual se puede limitar la viabilidad de esta técnica.

- A diferencia de las nuevas tecnologías para el manejo de volúmenes de escorrentía, el almacenamiento activo no permite la infiltración, ni mejora notablemente la calidad del agua que va a ser retornada al sistema de drenaje.

- Las fugas de las cisternas sub superficiales pueden generar inestabilidades del terreno causando problemas estructurales.

- El almacenamiento de agua lluvia puede generar un problema si se requiere para consumo humano y no se tienen los sistemas de potabilización requeridos.

- En la mayoría de casos, no pueden ser operados y mantenidos por el mismo propietario y resultan mucho más costosos de implementar, operar y mantener que los sistemas pasivos.

5.2. Desempeño y Eficiencia

Una vez conocidas las características generales, los componentes y los tipos de sistemas activos de almacenamiento de agua lluvia (cisternas y tanques de lluvia), es necesario analizar el desempeño, la eficiencia y la influencia que estas tecnologías presentan en cuanto a la cantidad y calidad del agua lluvia.

5.2.1. Desempeño en cuanto a la cantidad

A continuación se van a analizar algunos de los estudios más importantes que se han efectuado para cuantificar el desempeño, la eficiencia y la influencia que los sistemas de almacenamiento activo generan en cuanto a la cantidad del agua lluvia, es decir, en el alivio de los sistemas de drenaje por atenuación de picos y volúmenes de escorrentía.

En un estudio, Vaes & Berlamont, 2001 [78], desarrollaron un modelo conceptual para evaluar el efecto que generan los tanques de almacenamiento de agua lluvia en la escorrentía, empleando

información hidrológica histórica. Para ellos, el efecto que tiene la retención en la fuente del agua lluvia para el diseño de los sistemas de drenaje, solo puede ser abordado empleando registros hidrológicos de variabilidad temporal intrínseca debido a que los largos periodos antecedentes tienen una gran importancia. Para incorporar dicho efecto, se creó un modelo para evaluar el impacto de los tanques de almacenamiento en las series históricas de lluvia e incorporarlo en una lluvia compuesta modificada. Para ello, desarrollaron un simple modelo de retención con una salida constante igual a la demanda promedio de consumo interno y externo. Igualmente, se tuvo en cuenta una fracción α de la lluvia que cae en el área de captación y que efectivamente llega al tanque de almanceamiento, y el resto de la lluvia (1-α) que cae en las demás superficies impermeables y que llega directamente al sistema de drenaje. Por otra parte, se tuvo en cuenta que una vez el tanque estuviera lleno, el agua almacenada allí empezaría a desbordarse hasta llegar al sistema de drenaje. En la figura a continuación se puede apreciar un sistema de almacenamiento activo mediante el cual se basasaron en este estudio para desarrollar el modelo conceptual descrito anteriormente.

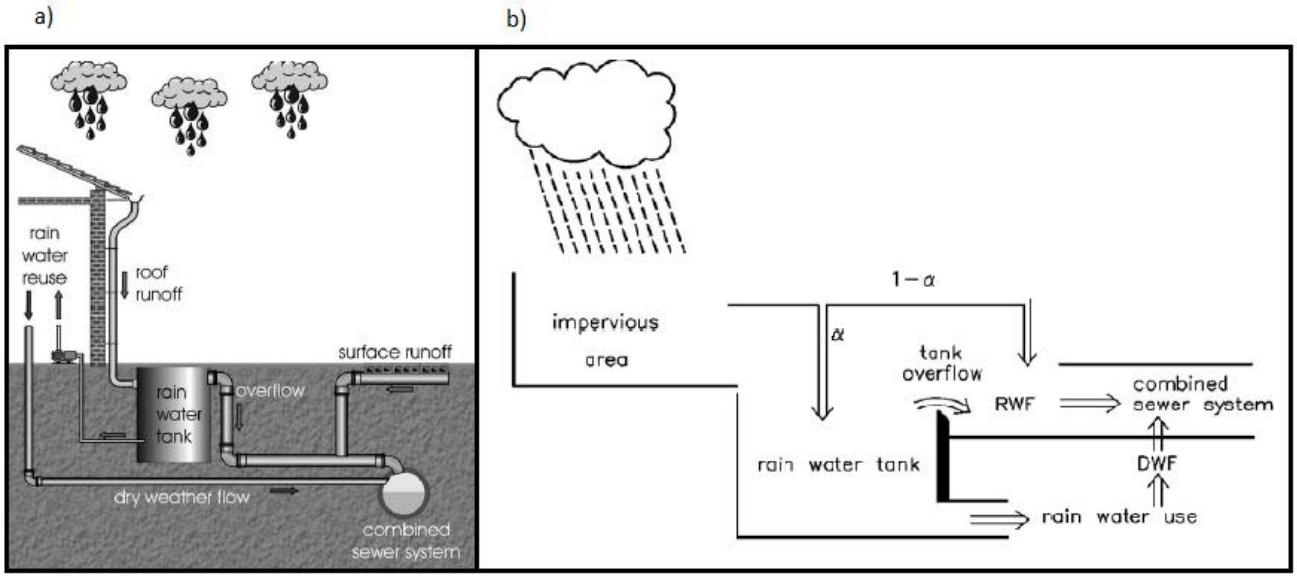


Figura 5-3. a) Esquema conceptual del funcionamiento de un sistema activo de almacenamiento (Adaptada de: [78]), b) modelo conceptual de retención simple (Adaptada de: [78])

En la Figura 5-4, se muestra un ejemplo desarrollado en el cual se pretendió evaluar el efecto que tenían unos tanques de almacenamiento con una capacidad igual a 5,000 L por cada m² de área impermeable, instalados en el 30% del área impermeable total de una cuenca urbana, para una lluvia con un periodo de retorno de 5 años. Igualmente se supuso un reuso constante de 100 L por día por cada 100 m² de área de captación. El resultado del estudio permitió concluir que gracias a la implementación de este tipo de tecnología, se pudo reducir el pico de caudal dentro del sistema de drenaje de tal forma, que la lluvia evaluada con un periodo de retorno de 5 años es como si hubiera sido equivalente a otra con periodo de retorno de 1 año.

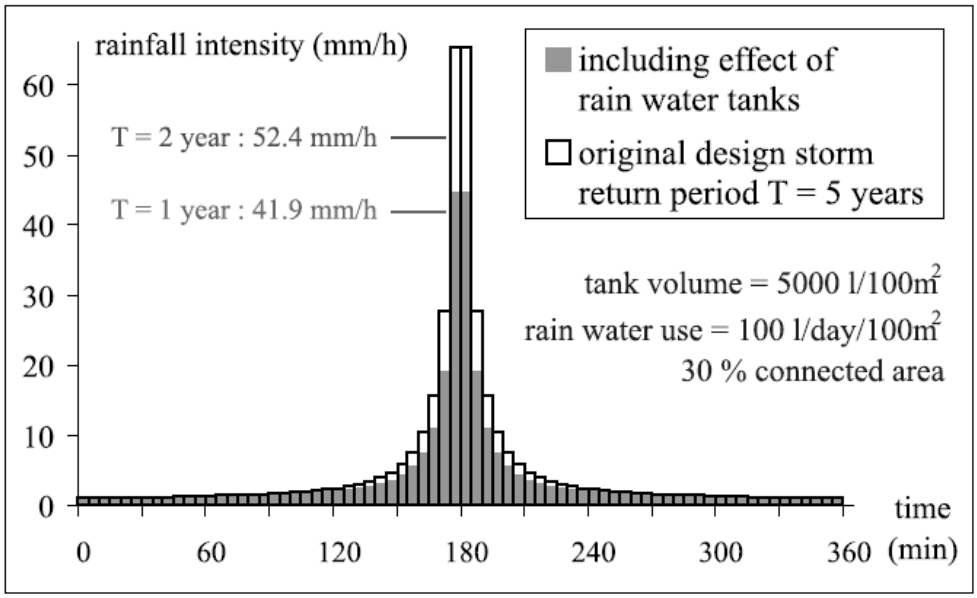


Figura 5-4. Resultados estudio [78]. Efecto de tanques de almacenamiento en lluvias fuertes. (Fuente: [78])

Aunque el almacenamiento de sistemas activos de retención de agua lluvia y las tecnologías de infiltración no están completamente disponibles para eventos fuertes de lluvia (debido a su condición de saturación), las técnicas de almacenamiento colocadas aguas arriba de un sistema de drenaje, tienen una gran influencia en la reducción de la escorrentía. En este estudio se pudo demostrar que los sistemas activos de retención de agua lluvia bien diseñados reducen efectivamente los picos de caudal en sistemas de drenaje si son instalados masivamente.

En otro estudio, citado anteriormente en el numeral 4.2.1 [74], aparte de evaluar la eficiencia de los barriles de agua lluvia en la reducción de volúmenes de escorrentia, también se planteó un escenario 4 en el cual todos los predios de la cuenca urbana estaban equipados con tanques más grandes. Es decir que aparte de evaluar los sistemas pasivos de almacenamiento, se evaluó el efecto de los sistemas activos. Dicho escenario se planteó para cuantificar el efecto máximo dado un volumen de almacenamiento mucho mayor por tanque instalado. En la siguiente imagen se puede apreciar que cuando la lluvia es fuerte (gran intensidad), se pudo concluir que la lluvia excede la capacidad de almacenamiento de los barriles de agua lluvia. Un así, para el cuarto escenario (almacenamiento activo), la reducción en el pico de caudal de escorrentía corresponde a cerca del 10%, lo cual permitiría el alivio de las estructuras de alcantarillado existente.

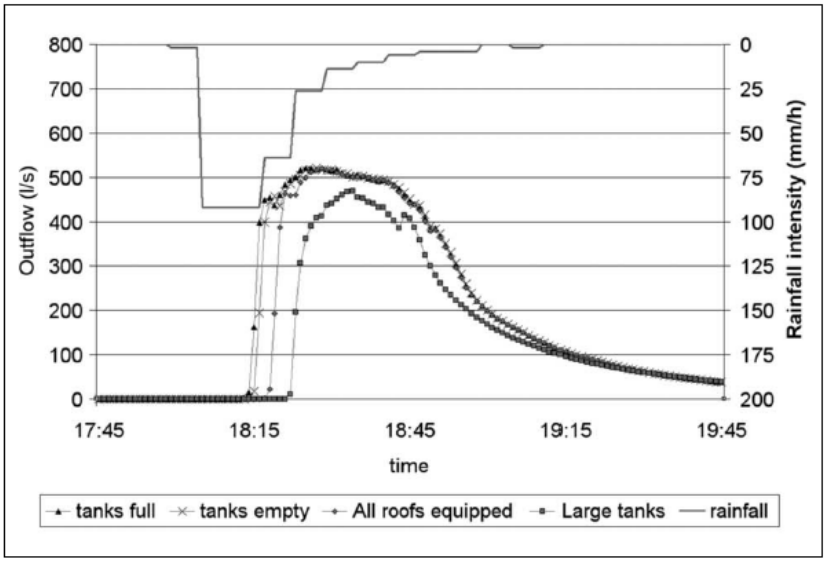


Figura 5-5. Resultados del estudio [74]. Efecto de la instalación de tanques más grandes sobre la reducción de picos de caudal para eventos fuertes de lluvia. (Fuente: [74])

De acuerdo con este estudio, se observó que a medida que incrementaba la lluvia, la eficiencia de los sistemas activos de almacenamiento se reducía, pero a una tasa mucho menor a la cual decrece la eficiencia de los barriles de agua lluvia. Lo anterior permite concluir, que a pesar de que el almacenamiento activo solo alcanza a reducir el 10% del volumen de escorrentíaaun para eventos muy intensos de lluvia, resulta una técnica mucho más efectiva que el almacenamiento pasivo, si ambos se aplican masivamente a una cuenca urbana de drenaje.

Acercándose más al contexto local, Ávila & Díaz, 2012 [40], desarrollaron un estudio para evaluar la aplicación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDs) para la cuenca urbana de la ciudad de Barranquilla. Recordando del numeral 2.3.3.1, el sistema hidrológico de Barranquilla forma parte de la cuenca baja de río Magdalena, del cual extrae un caudal medio de 6.5 m^3/s para su abastecimiento generando un consumo aproximado de 4 m^3/s. La cobertura de acueducto es del 99% y la de alcantarillado del 95%, pero actualmente no existe un alcantarillado pluvial formal lo cual genera el grave problema de los arroyos que se forman en épocas de lluvia y que afectan a miles de personas y a la economía de la región. Por otra parte, las áreas permeables producto del desarrollo urbano son prácticamente inexistentes lo cual agrava el problema al incrementar el caudal y el tiempo de respuesta de los arroyos ante un evento fuerte de lluvia [37].

Teniendo en cuenta esta problemática inminente, este estudio pretendió explorar alternativas de almacenamiento temporal domiciliario, aplicadas en forma masiva, para reducir el volumen de escorrentía y el caudal pico. El proyecto se efectuó en una cuenca urbana de la ciudad de Barranquilla, Colombia, denominada “cuenca del arroyo de la 93”, con un área de 396 Ha y un uso de suelo residencial y comercial predominantemente. La respuesta hidrológica-hidráulica de la cuenca para sus condiciones iniciales (sin implementación de SUDs) fue modelada con PCSWMM, la topografía fue obtenida a partir de elevaciones STRM-USGS (2004) y para la ejecución del modelo se tomaron los datos de la estación del IDEAM del Aeropuerto Cortissoz de Barranquilla. Los resultados de la simulación bajo las condiciones pre-implementación de SUDs en términos de respuesta hidrológica y volúmenes de escorrentía fueron obtenidos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Los sistemas de drenaje urbano sostenibles (SUDs) empleados en la modelación fueron: 1) jardines de lluvia, 2) tanques de almacenamiento (sistemas activos) y 3) techos de almacenamiento. Los tanques de almacenamiento empleados tenían una capacidad de retención de 5 m³, y se supuso que para cada predio se instalaba un número de unidades proporcional a la cantidad de viviendas. En total se simularon 5,579 tanques de almacenamiento, lo cual permitía un volumen de retención total de 27,895 m³. Se evaluó la efectividad de cada alternativa individualmente y algunas combinaciones entre éstas. En total se plantearon 7 posibles escenarios que se describen a continuación:

1. Solo evaluación de jardines de lluvia.
2. Solo evaluación de tanques de almacenamiento (sistemas activos).
3. Solo evaluación de techos de almacenamiento.
4. Combinación entre escenarios 1, 2 y 3(jardines, tanques y techos).
5. Combinación entre escenarios 1 y 2 (jardines y tanques).
6. Combinación entre escenarios 1 y 3 (jardines y techos).
7. Combinación entre escenarios 2 y 3 (tanques y techos).

En la Tabla 5-2, se pueden apreciar los resultados obtenidos en este estudio. Nótese que los tanques de almacenamiento tuvieron un efecto importante en la reducción de volumen debido a que se encontraban dispersos en toda la cuenca (masivamente) y su volumen acumulado es significativamente alto para el área de la cuenca de estudio. Dichos tanques (escenario 2) alcanzaron una reducción del 8.3% y del 5.40% para eventos de lluvia con periodos de retorno de 2 y 100 años respectivamente.

Tabla 5-2. Resultados estudio [40]. Evaluación de escenarios propuestos en la reducción de volumen de escorrentía (Adaptada de: [40])

Escenario 2	**2T**	**25T**	**50T**	**100T**
Volumen sin LID (m³)	33 448	46 474	49 219	51 829
Volumen con LID (m³)	30 666	43 697	46 444	49 053
Diferencia (m³)	2 782	2 777	2 775	2 776
Reducción (%)	8.30%	6.00%	5.60%	5.40%
Escenario 4	**2T**	**25T**	**50T**	**100T**
Volumen sin LID (m³)	33 448	46 474	49 219	51 829
Volumen con LID (m³)	28 026	40 559	43 207	45 730
Diferencia (m³)	5 422	5 915	6 012	6 099
Reducción (%)	16.20%	12.70%	12.20%	11.80%
Escenario 7	**2T**	**25T**	**50T**	**100T**
Volumen sin LID (m³)	33 448	46 474	49 219	51 829
Volumen con LID (m³)	28 462	40 982	43 630	46 150
Diferencia (m³)	4 986	5 492	5 589	5 679
Reducción (%)	14.90%	11.80%	11.40%	11.00%

Por otra parte, cuando se operan los 3 LID al tiempo (escenario 4), se obtiene la mayor reducción en los volúmenes de escorrentía, como era de esperarse. Se obtuvieron decrementos de 14.9% para una lluvia con periodo de retorno de 2 años y de 11.0% para una de 100 años. Es importante destacar que cuando se evaluó el escenario 7 (solo tanques y techos de almacenamiento) se obtuvieron valores

muy cercanos a los que reportó el escenario anterior. Esto significa que los jardines de lluvia prácticamente no tuvieron efecto, y no constituyen una tecnología LID muy efectiva si se compara con el almacenamiento activo.

Otra conclusión importante de este estudio fue que la reducción en los volúmenes de escorrentía es mayor cuando se tiene un menor periodo de retorno, es decir cuando la lluvia es menos fuerte, debido a que el volumen de precipitación es comparable en magnitud con la capacidad de almacenamiento por infiltración. Asimismo, el rendimiento de los sistemas de almacenamiento activo (tanques y cisternas) es mayor cuando se operan junto con otras tecnologías LID. Sin embargo, lo anterior genera mayores costos al momento de instalar dichos sistemas en una cuenca urbana consolidada, teniendo en cuenta que su implementación requiere de espacio y adecuación de infraestructura existente.

En otro estudio [76], citado anteriormente en el numeral 4.2.1, se realizó un análisis sobre el desempeño proyectado de los sistemas pasivos de almacenamiento de agua lluvia para distintas ciudades de Estados Unidos. De la misma forma que en el estudio de Petrucci, et al., 2012 [74] , se evaluaron los sistemas de almacenamiento activo (tanques y cisternas de almacenamiento) en cuanto a la reducción de la escorrentía. En dicho estudio se demostró que una cisterna simple de 500 galones (1,890 L) puede reducir en promedio cerca del 12%, es decir para ciudades que se encuentran en regiones tanto semi áridas como húmedas. Dicho valor puede aumentar hasta cerca del 17% para ciudades que se encuentran en regiones semi áridas y al 12% para regiones húmedas. En la siguiente figura se pueden apreciar los resultados obtenidos del estudio.

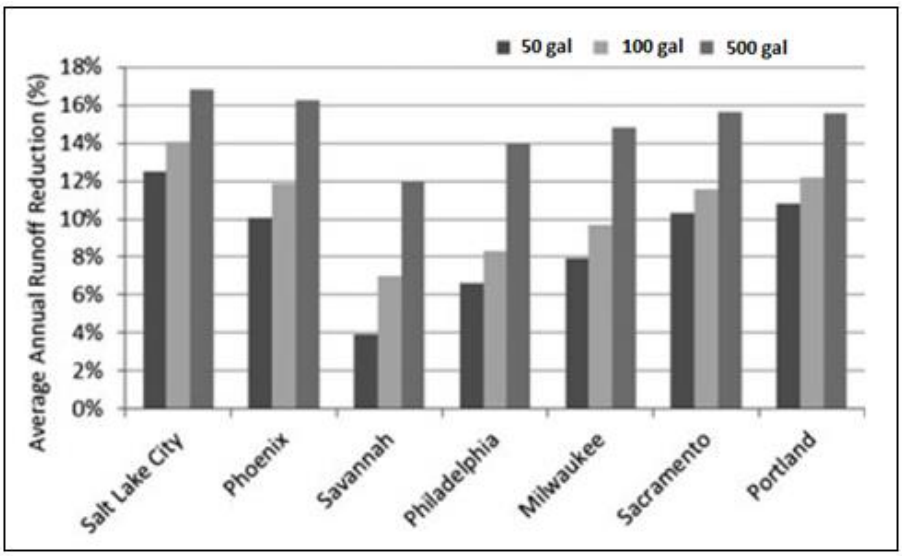


Figura 5-6. Resultados estudio [76]. Reducciones del volumen medio anual de agua lluvia para distintas ciudades de Estados Unidos (Adaptada de: [76]).

Finalmente, otro estudio [79], cuantificó la eficiencia de dos configuraciones distintas para un sistema de almacenamiento activo de agua lluvia (“on-line” y “offline”) en cuanto al periodo de retorno de la lluvia con respecto al número de desbordamientos y a su eficiencia como tal. Los sistemas de almacenamiento activo se pueden considerar como de configuración “on-line” y por lo tanto solo se va a discutir acerca de estos. Se tuvieron en cuenta 5 escenarios: el primero sin tener en cuenta el almacenamiento, el segundo, tercero, cuarto y quinto con una retención de 5 m³, 25 m³, 50

m³ y 100 m³ por cada hectárea impermeable respectivamente. En la Figura 5-7 se pueden observar los resultados obtenidos por este estudio.

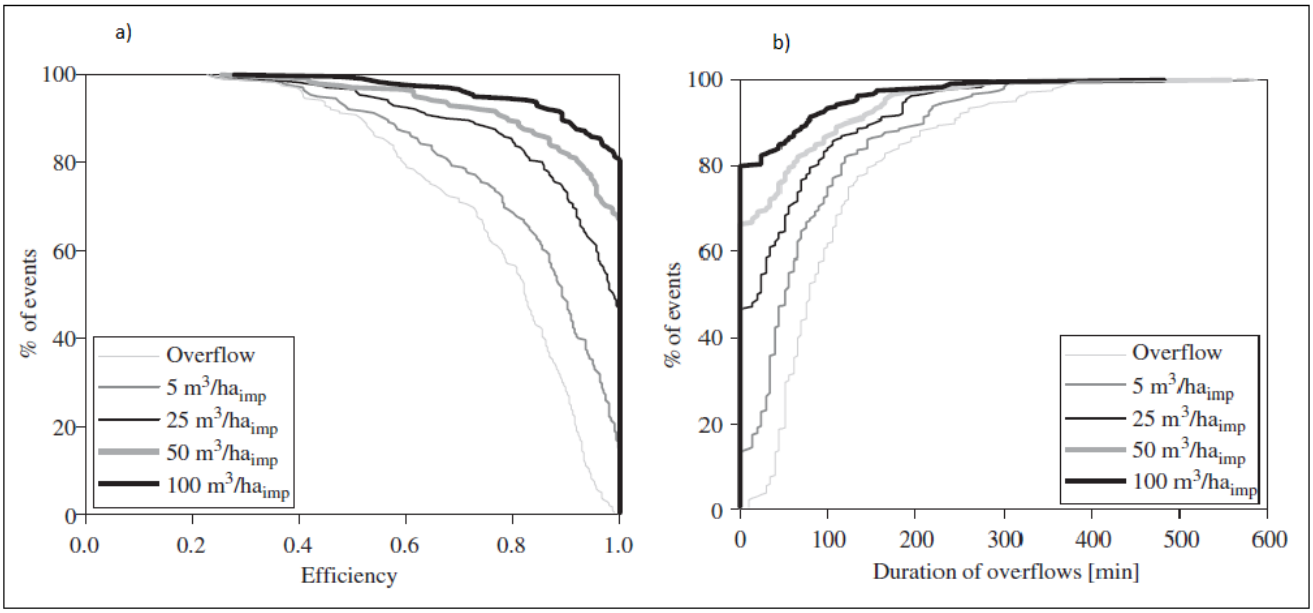


Figura 5-7. Resultados estudio [79]. a) Eficiencia de los sistemas activos de almacenamiento con respecto a distintos periodos de retorno (Fuente: [79]) y b) duración de los desbordamientos en los sistemas activos de almacenamiento con respecto varios periodos de retorno (Fuente: [79])

Si se observa el esquema a) de la figura anterior, es claro que a medida que la lluvia es más intensa (mayor periodo de retorno), las eficiencias de los distintos sistemas tienden a converger cerca del 30% (para un T=100 años). Por el contrario, a medida que la lluvia es menos intensa (menor periodo de retorno) las eficiencias tienden a converger al 100%. Lo anterior indica que los sistemas activos de almacenamiento pierden efectividad a medida que la lluvia es más intensa, y que no importa si se incrementa el tamaño de los mismos, su atenuación en cuanto a volúmenes de escorrentía va a tender al mismo valor de eficiencia. Por otra parte, el estudio demostró que un almacenamiento de 100 m³ por hectárea impermeable es 100% efectivo en reducciones de volúmenes de escorrentía para lluvias con periodos de retorno menores a 80 años. Un almacenamiento de 50 m³ por hectárea impermeable es completamente eficiente para lluvias con periodos de retorno menores a 70 años. Por otro lado, las de 25 y 5 m³ por hectárea impermeable resultan 100% efectivas para lluvias de baja intensidad (entre 0 y 15 años de retorno) si se compara con las demás.

Por otro lado, el esquema b) indica que, como era de esperarse, la duración de los desbordamientos es mucho mayor para lluvias con mayores periodos de retorno, y que éstas tienden a cero (es decir efectividad del 100%) a medida que se tiene mayor almacenamiento por hectárea impermeable.

De acuerdo con los estudios analizados anteriormente, y a algunos otros consultados, se puede concluir lo siguiente acerca del desempeño y eficiencia de los sistemas de almacenamiento activo (tanques y cisternas de almacenamiento) en cuanto a aspectos de reducción de volúmenes de escorrentía y picos de caudal:

- Los sistemas de almacenamiento activo colocados aguas arriba de un sistema de drenaje tienen una gran influencia en la reducción de la escorrentía. Se pudo demostrar que los

sistemas activos de retención de agua lluvia bien diseñados reducen efectivamente los picos de caudal en sistemas de drenaje si son instalados masivamente. Dichas reducciones pueden estar en promedio entre el 10% y el 17% dependiendo de muchos factores como el tamaño del almacenamiento, el área impermeable de la cuenca, el periodo seco antecedente, etc.

- Se observó que a medida que incrementaba la lluvia, la eficiencia de los sistemas activos de almacenamiento se reducía, pero a una tasa mucho menor a la cual decrece la eficiencia de los barriles de agua lluvia. Lo anterior permite concluir, que a pesar de que el almacenamiento activo solo alcanza reducciones entre el 10% y 17% del volumen de escorrentía aun para eventos muy intensos de lluvia, resulta una técnica mucho más efectiva que el almacenamiento pasivo, si ambos se aplican masivamente a una cuenca urbana de drenaje.

- El rendimiento de los sistemas de almacenamiento activo (tanques y cisternas) es mayor cuando se operan junto con otras tecnologías LID. Sin embargo, lo anterior genera mayores costos al momento de instalar dichos sistemas en una cuenca urbana consolidada, teniendo en cuenta que su implementación requiere de espacio y adecuación de infraestructura existente.

- Otro tipo de tecnologías LID, tales como los jardines de lluvia y mecanismos de infiltración. no generan el mismo efecto en cuanto a la reducción de volúmenes de escorrentía, y por lo tanto, no constituyen una tecnología LID muy efectiva si se compara con el almacenamiento activo.

- Los sistemas activos de almacenamiento pierden efectividad a medida que la lluvia es más intensa, y no importa si se incrementa el tamaño de los mismos, su atenuación en cuanto a volúmenes de escorrentía va a tender al mismo valor de eficiencia. Por otra parte, la duración de los desbordamientos es mucho mayor para lluvias con mayores periodos de retorno, y tienden a cero (es decir efectividad del 100%) a medida que se tiene mayor almacenamiento por hectárea impermeable.

5.2.2. Desempeño en cuanto a la calidad

No es propósito de este documento profundizar en aspectos de calidad del agua, pero es muy importante mencionar la capacidad que tienen los sistemas de almacenamiento activo en cuanto a la reducción de cargas contaminantes y de otro tipo de indicadores de calidad del agua. Es sabido que los tanques y cisternas de almacenamiento generan un impacto medio en cuanto a la atenuación de los volúmenes de escorrentía que llegan a los sistemas de drenaje (10-17%), razón por la cual es de esperarse se generen reducciones significativas pero no completas de cargas contaminantes. Lo que sí es de esperarse, es que los sistemas activos tengan una mayor eficiencia en cuanto al mejoramiento de la calidad del agua que los sistemas pasivos. A continuación se van a analizar un par de estudios que evalúan la eficiencia del almacenamiento activo en cuanto a la calidad del agua y se plantean las conclusiones pertinentes.

En un estudio [80], se intentó evaluar la efectividad de los tanques de almacenamiento como un potencial elemento sensible de diseño para manejar la calidad del agua lluvia en un sistema de drenaje. Para ello, se decidió determinar las cargas de contaminantes en sistemas de drenaje a partir

de las concentraciones generadas de un parcela residencial de la ciudad de Melbourne, Australia, equipado con un tanque de almacenamiento para recolectar y almacenar el agua lluvia. El modelo empleado fue el "The Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation" (Music, 2007) para poder evaluar el desempeño del tanque de almacenamiento en cuanto a aspectos de calidad del agua.

El estudio se efectuó para un predio residencial típico (3 personas) de la ciudad de Melbourne. Se consideró que el área de captación (techo) conectada al tanque de retención variaba entre 50 m² y 200 m². Se desarrolló un análisis de escenarios para 7 combinaciones diferentes de demanda interna del agua, para cuantificar el porcentaje de reducción de la escorrentía, y parámetros de calidad del agua como sólidos suspendidos totales (TSS), nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP), si el 100% de los predios de una parcela residencial eran conectados a un mismo tanque. Los escenarios fueron los siguientes:

1. Un tanque de 3,000 L (800 galones) fue empleado para determinar el porcentaje de reducción de contaminantes para distintas demandas de agua. El área de captación se consideró constante (112.5 m²).
2. Se supuso demanda solo para sanitarios, lavandería e irrigación de jardines con variación en el tanque de almacenamiento desde 1,000 L (270 galones) hasta 5,000 L (1320 galones). El área de captación se consideró constante (112.5 m²).
3. Un tanque de 3,000 L (800 galones) fue empleado para distintas demandas de agua y distintas áreas de captación que variaban entre 50 m² hasta 200 m².

Para el escenario 1, se observó que para distintas combinaciones de demanda de agua, la reducción en TSS, TN y TP fue considerable. La reducción en sólidos suspendidos totales (TSS) fue en promedio del 95% con un valor máximo cuando se tiene demanda combinada (sanitarios, lavandería e irrigación de jardines) de 96.9%. La reducción en nitrógeno total (TN) fue en promedio del 67%, e igualmente con un valor máximo cuando se tiene demanda combinada (sanitarios, lavandería e irrigación de jardines) de 80.7%. La reducción en fósforo total (TP) fue en promedio del 83%, e igualmente con un valor máximo cuando se tiene demanda combinada de 90.1%.

En cuanto al escenario 2, se encontró que el porcentaje de reducción en cuanto a TSS no depende del tamaño del tanque. Aun así, para TN y TP, el tamaño del tanque es proporcional con la reducción de estos parámetros de calidad. Cuando el tanque se varía desde 1,000 L hasta 5,000 L, la reducción del fósforo total (TP) varía del 84% al 93%. Igualmente, cuando se varía ese mismo volumen del tanque, la reducción del nitrógeno total (TN) varía del 68% al 87%. En el escenario 3 se observó, y como era de esperarse, que a medida que se incremente el área de captación, las reducciones en los parámetros de calidad del agua se reducían considerablemente. Es decir que empeoraba la calidad del agua producto de tener mayor área de captación.

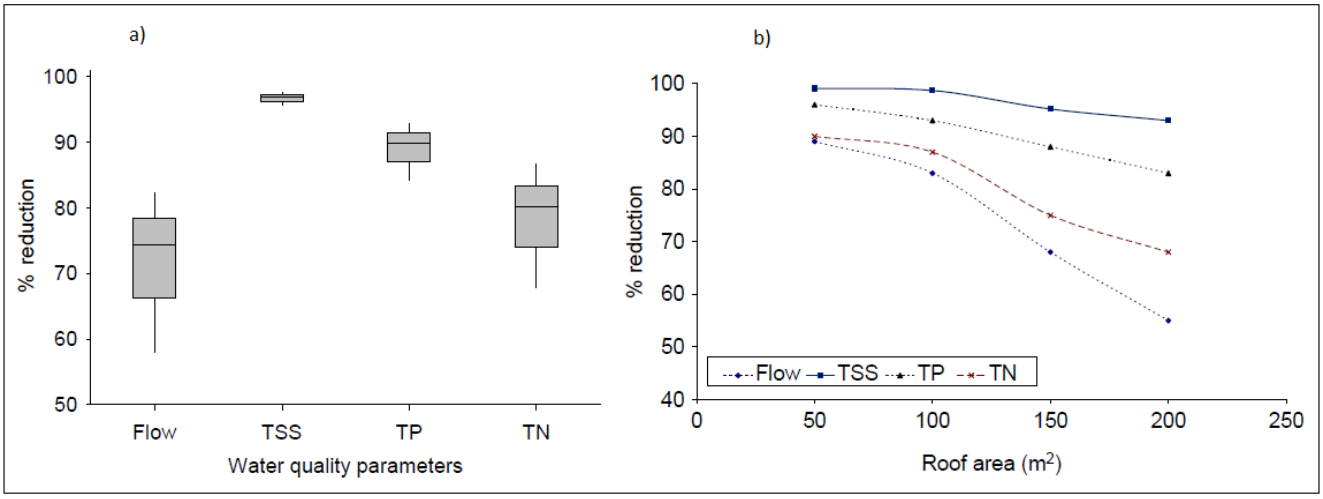


Figura 5-8. Resultados estudio [80]. a) Resultados escenario 2: sensibilidad al tamaño del tanque (Fuente: [80]), b) Resultados escenario 3: sensibilidad a variaciones en el área de captación (Fuente: [80])

El estudio anterior concluyó que existe un impacto considerable en el mejoramiento de la calidad del agua almacenada que llega al sistema de drenaje debido a las variaciones en la demanda de la misma, con valores promedio del 95%, 67% y 83% para sólidos suspendidos totales (TSS), nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP) respectivamente. Asimismo concluyó que el porcentaje de reducción en cuanto a TSS no depende del tamaño del tanque a diferencia del TN y TP, los cuales mejoran su reducción a medida que hay más capacidad de almacenamiento. Finalmente, las reducciones disminuyen, es decir que empeora la calidad del agua producto de tener mayor área de captación.

Por otro lado, en uno de los estudios [79] analizados en el numeral 5.2.1, se pretendió también evaluar la eficiencia de los tanques de almacenamiento de dos configuraciones distintas para un sistema de almacenamiento activo de agua lluvia (“on-line” y “offline”). Para ello, emplearon la concentración de sólidos suspendidos totales (TSS) como parámetro para cuantificar la calidad del agua, ya que está fuertemente correlacionado a otros parámetros significativos. Se plantearon distintos escenarios (como se describió previamente) para distintos niveles de almacenamiento: de 5 m^3, 25 m^3, 50 m^3 y 100 m^3 por cada hectárea impermeable respectivamente. Igualmente, se evaluaron los resultados para distintos tipos de lluvias con diferentes periodos de retorno, para evidenciar la sensibilidad hacia esta variable. En la Figura 5-9 se pueden observar los resultados obtenidos en cuanto al parámetro analizado de calidad del agua.

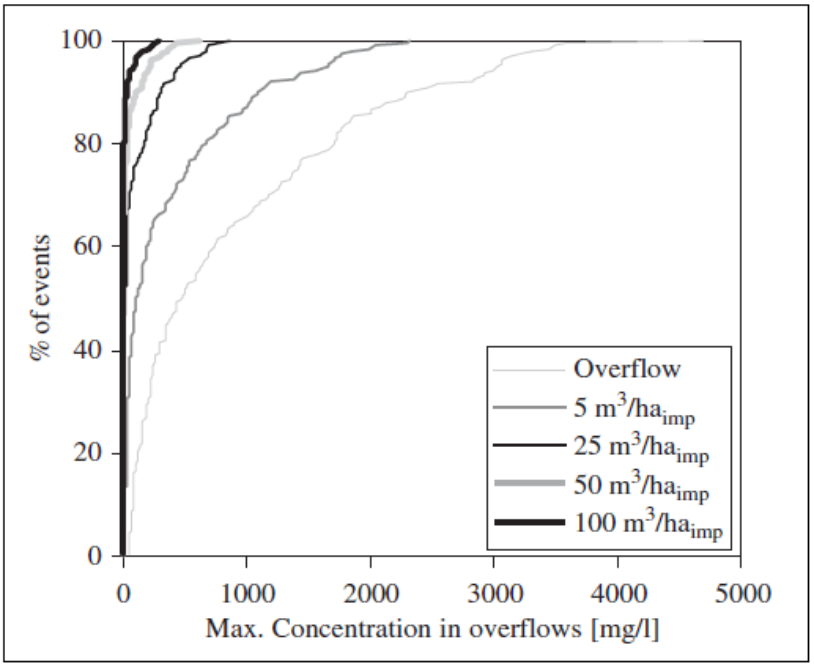


Figura 5-9. Resultados estudio [79]. a) Eficiencia de los sistemas activos de almacenamiento en cuanto a la concentración de TSS para distintos periodos de retorno (Fuente: [79])

La figura anterior, indica que la concentración de sólidos suspendidos totales (TSS) es mucho mayor para lluvias con mayores periodos de retorno, y que éstas tienden a cero (es decir cero concentración) a medida que se tiene mayor almacenamiento por hectárea impermeable. Dado lo analizado en este estudio, se puede concluir que a medida que se tiene mayor almacenamiento y la lluvia es menos intensa, la calidad del agua retenida mejora considerablemente. Y por el contrario, a medida que se reduce el almacenamiento y se incrementa la intensidad de la lluvia, la calidad del agua retenida empeora considerablemente

Otros estudios [81, 82, 83], han intentado caracterizar la calidad del agua lluvia retenida en distintos sistemas de almacenamiento activo existentes alrededor del mundo. Básicamente se emplean los mismos parámetros de calidad del agua analizados anteriormente y se llegan a resultados muy similares. Si se desea profundizar en aspectos de calidad del agua, se recomienda revisar los artículos citados.

De acuerdo con los estudios analizados anteriormente, y a algunos otros consultados, se puede concluir lo siguiente acerca del desempeño y eficiencia de los sistemas de almacenamiento activo (tanques y cisternas) en cuanto a aspectos de calidad del agua:

- Existe un impacto considerable en el mejoramiento de la calidad del agua almacenada que llega al sistema de drenaje debido a las variaciones en la demanda de la misma, con valores promedio del 95%, 67% y 83% para sólidos suspendidos totales (TSS), nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP) respectivamente.

- El porcentaje de reducción en cuanto a TSS no depende del tamaño del tanque a diferencia del TN y TP, los cuales mejoran su reducción a medida que hay más capacidad de

almacenamiento. Por otro lado, las reducciones disminuyen, es decir que empeora la calidad del agua producto de tener mayor área de captación.

- A medida que se tiene mayor almacenamiento y la lluvia es menos intensa, la calidad del agua retenida mejora considerablemente. Y por el contrario, a medida que se reduce el almacenamiento y se incrementa la intensidad de la lluvia, la calidad del agua retenida empeora considerablemente

- A diferencia del almacenamiento pasivo, el almacenamiento activo es mucho más efectivo en la reducción de cargas contaminantes (TSS, TP y TN) tanto para lluvias de baja intensidad como para lluvias de alta intensidad.

- El agua almacenada en un tanque o cisterna de retención puede constituir en una fuente de agua limpia, segura y confiable siempre y cuando el sistema de recolección y transporte se encuentre debidamente construido y mantenido.

6. NUEVAS TECNOLOGÍAS RETENCIÓN/INFILTRACIÓN (AQUACELL)

En esta Capítulo se van a analizar las nuevas tecnologías que ofrecen la opción tanto de almacenamiento activo como de infiltración. Corresponden a sistemas modulares interconectados con una mayor capacidad de atenuación de volúmenes y picos de caudal ante eventos de lluvia, y son instalados sub superficialmente pues requieren de bastante espacio. En este capítulo se profundizará sobre la tecnología "Aquacell" desarrollada por Wavin Overseas B.V.[14] e implementado en Colombia por Pavco – Mexichem[15].

6.1. Descripción General

6.1.1. Características, tipos y componentes

El desarrollo urbano de grandes ciudades ha tenido como consecuencia la generación de grandes áreas superficiales impermeables tales como techos, parqueaderos y pavimentos. Como resultado, la escorrentía superficial se ha incrementado en algunos casos cerca del 80%, generando problemas en el manejo del agua tales como inundaciones y sobrecargas de los sistemas de drenaje. Los sistemas modulares o las nuevas tecnologías de retención/infiltración tales como Aquacell han surgido como respuesta ante los problemas inminentes del manejo del agua lluvia ofreciendo control en la fuente mediante tres opciones [84]:

- Control de la escorrentía superficial al ofrecer retención temporal de los excesos de agua lluvia que se generan en un evento y limitando su descarga a los sistemas de drenaje o directamente al cuerpo receptor.

- Control de la escorrentía superficial al ofrecer infiltración del agua lluvia de exceso que se genera en un evento. De esta forma se recarga el agua subterránea y se alivia el sistema de drenaje.

- Control de la escorrentía superficial al ofrecer reutilización del agua lluvia en actividades externas tales como irrigación de jardines y lavado de autos, e internas tales como descarga de sanitarios y lavandería.

Los sistemas modulares, dada su naturaleza, hacen que sea una alternativa de manejo de agua lluvia eficiente independientemente de los requerimientos del lugar en el cual se planean instalar. Pueden ser empelados para proveer almacenamiento para la reducción de volúmenes de agua lluvia y para reutilización dentro del establecimiento, a la vez que pueden ofrecer infiltración. Pueden ser de diversos tamaños, pues corresponden a unidades modulares que pueden ser conectadas dependiendo de los requerimientos específicos del sitio. Igualmente pueden ser empleados a baja escala, es decir para predios residenciales o para pequeñas áreas de captación, o pueden emplearse a gran escala, es decir para predios comerciales, institucionales, parqueaderos o para grandes áreas de captación [85].

[14] Wavin Overseas B.V., solutions for essentials. Disponible en línea en: www.wavinoverseas.com
[15] Pavco – Mexichem. Disponible en línea en: http://www.pavco.com.co/

El sistema Aquacell corresponde a módulos individuales de polipropileno ensamblados para formar una estructura sub superficial empleada tanto para la detención del agua lluvia, como para su infiltración. Estos sistemas brindan una mayor capacidad de retención y atenuación de picos de caudal que los sistemas activos y pasivos de almacenamiento, pues pueden ser empelados a mayor escala y para las áreas de captación que se desee.

En la Figura 6-1 se pueden apreciar distintas configuraciones de sistemas modulares de almacenamiento/infiltración de agua lluvia. En el esquema a) se puede apreciar un sistema convencional de la tecnología Aquacell desarollada por Wavin. Nótese que se trata de sistemas modulares tipo caja ensamblados para formar una gran estructura. En el esquema b) se encuentra un sistema convencional de la tecnología Chamber-Maxx desarrollada por Contech. Nótese que a diferencia de la primera, ésta se trata de sistemas modulares tipo cilindro, que al igual que la anterior se ensamblan para generar mayor capacidad de almacenamiento y/o infiltración.

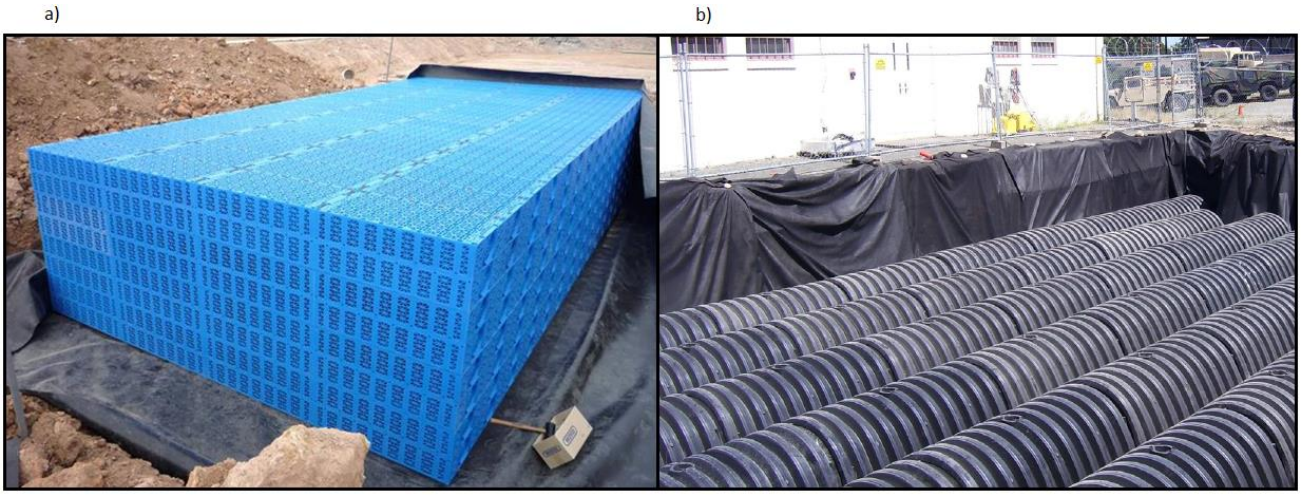


Figura 6-1. Diferentes tipos y configuraciones de sistemas modulares de almacenamiento/infiltración de agua lluvia: a) sistema típico de Aquacell-Wavin (Fuente: [86]), b) sistema típico de Chamber Maxx-Contech[16]

A continuación se va a hacer énfasis en el funcionamiento de este tipo de sistemas y de los componentes que los conforman. El agua lluvia que excede la capacidad del sistema convencional de drenaje de una cuenca urbana es atenuado mediante el control de una cámara y canalizado dentro de la estructura modular de almacenamiento/infiltración. La estructura interna de cada módulo está diseñada para controlar el agua entrante y brindarle almacenamiento temporal. Si el material mediante el cual se envuelve la estructura es impermeable, el agua permanece dentro del almacenamiento hasta un punto en el cual pueda ser canalizada hacia otra cámara de control mediante la cual se devuelve, a través de un mecanismo de desbordamiento, al sistema de drenaje existente/convencional. Sin embargo, si la envoltura es permeable, el agua temporalmente retenida empieza a infiltrarse a través del suelo siempre y cuando las propiedades de éste así lo permitan. Al controlar el agua lluvia en la fuente y permitir su infiltración, no solamente se está aliviando el sistema de drenaje tradicional de una cuenca urbana, sino que además, se está beneficiando el medio ambiente local.

[16] Imagen extraída de la red. Disponible en línea en: http://www.conteches.com/products/stormwater-management/detention-and-infiltration/chambermaxx.aspx#1862188-case-studies. Consultada el 13 de diciembre del 2013.

En la Figura 6-2 se puede apreciar un esquema típico sobre el funcionamiento y los componentes básicos de un sistema modular de retención/infiltración de agua lluvia. Nótese que este tipo de tecnologías cuentan con los cuatro componentes básicos de cualquier sistema de captación del agua lluvia que son: 1) captación y transporte (collecting), 2) separación (separation), 3) sistema de almacenamiento (detention) y 4) sistema de entrega o distribución (usage). A continuación se profundiza en estos componentes básicos junto con los elementos que conforman cada uno:

1. Captación y transporte (collecting): La captación corresponde al área a la cual el agua lluvia cae, y el transporte y recolección corresponde a los elementos mediante los cuales el agua es transportada y dirigida hacia el almacenamiento. Para este tipo de sistemas, el área de captación pueden ser techos, pavimentos/parqueaderos y áreas correspondientes a estaciones petroleras o de manejo de hidrocarburos. Para este caso solo se van a tener en cuenta las dos primeras. En los numerales 3.2 y 3.4 se especificaron las características detalladas y consideraciones de diseño de este componente.

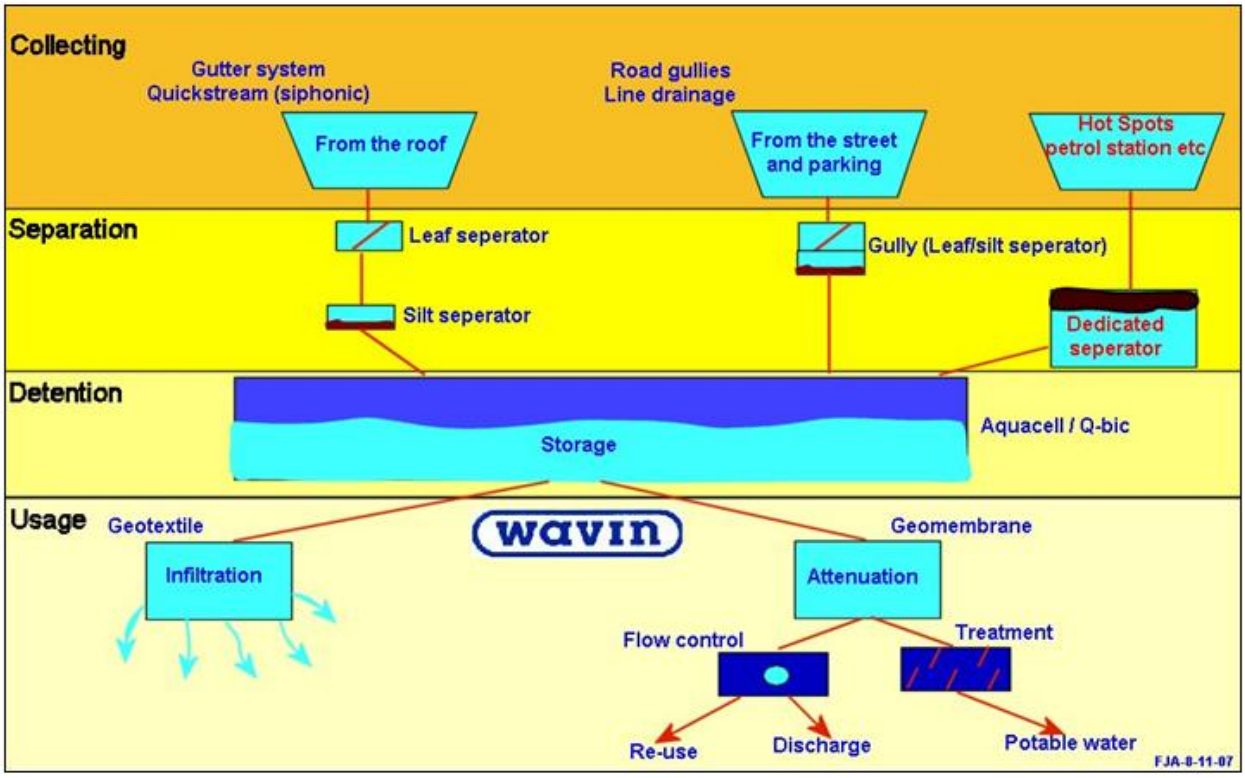


Figura 6-2. Esquema típico de un sistema modular de almacenamiento/infiltración de agua lluvia (Aquacell-Wavin) con sus componentes básicos (Fuente: [44, 86])

2. Separación (separation): Un aspecto muy importante de todo sistema modular de retención/infiltración es que debe considerar dispositivos de pre tratamiento del agua, con el fin de evitar que sedimentos, hojas, basura y ciertos contaminantes entren al almacenamiento. Estos dispositivos deben ser muy fáciles de mantener, y deben existir para asegurar el buen funcionamiento y eficiencia del sistema. En el numeral 3.4 se mencionaron algunos de estos dispositivos de pre tratamiento como las pantallas/filtro para hojas, desechos e insectos, desviadores de primer lavado, tanques sedimentadores y filtros de vórtice.

Para los sistemas modulares de almacenamiento/infiltración tales como el Aquacell, deben existir distintos métodos de pre tratamiento dependiendo del origen del sistema de captación y transporte. Si la captación se realizó en techos, es recomendable emplear un separador de hojas, que bien pueden ser las pantallas/filtro para hojas y desechos especificados en el numeral 3.4, o algunas otras un poco más sofisticadas. Igualmente es necesario, aparte del mecanismo de separación de hojas y desechos, tener un sedimentador o separador de sedimentos (silt separator).

En la Figura 6-3 a-1 y a-2) se puede observar un separador pequeño de sedimentos (desarrollado por Wavin) y su funcionamiento. Estos se emplean para aplicaciones más reducidas, es decir para áreas de captación y almacenamientos no tan grandes. Funcionan cuando las velocidades son lo suficientemente bajas para permitir que se sedimente el material particulado dentro de estos, y si las velocidades son mayores, pierden su eficiencia y dejan de filtrar al agua adecuadamente [44, 87]. El agua entra por una tubería de entrada, luego de haber pasado por el separador de hojas, e ingresa dentro de una cámara. Allí, el agua se va acumulando, sube el nivel, y es filtrada mediante un filtro especial. El agua filtrada, es evacuada mediante una tubería de salida y es dirigida hacia el elemento de almacenamiento. Por el contrario, en la Figura 6-3 b) se encuentra un separador hidrodinámico combinado desarrollado por Wavin, el cual se emplea más para aplicaciones a una mayor escala, es decir cuando el área y el elemento de almacenamiento son mayores. Estos separadores funcionan mejor para velocidades y volúmenes mayores. Su funcionamiento es muy similar al del sedimentador pequeño, a diferencia que éste no emplea un filtro para mejorar la calidad del agua, sino que por el contrario, emplea un mecanismo hidrodinámico el cual hace que se sedimente el material particulado; el agua relativamente limpia quede en la parte superior donde es finalmente evacuada. En el Capítulo 7 se profundizará en aspectos de operación y mantenimiento de estos sedimentadores.

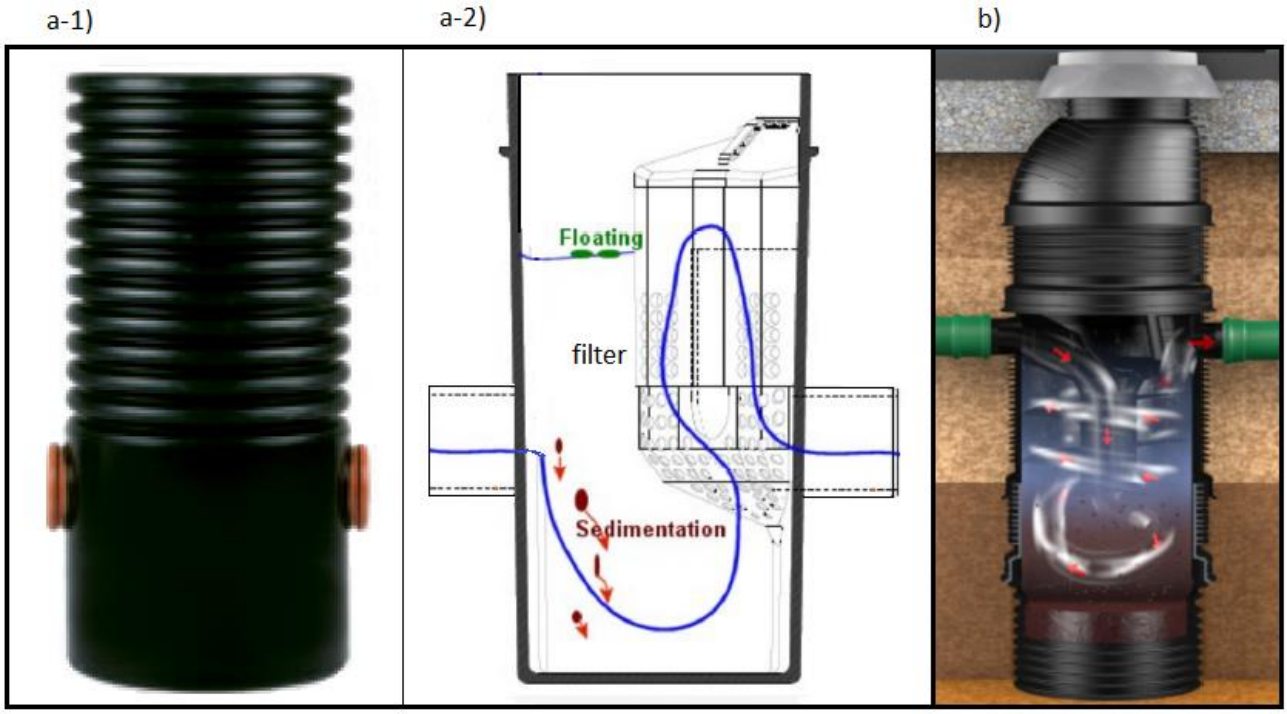


Figura 6-3. Dos tipos de separadores de sedimentos. a-1) separador pequeño de sedimentos (Silt Trap 6LB600 Wavin) (Fuente: [84]), a-2) funcionamiento del separador pequeño de sedimentos (Adaptada de: [44]) y b) separador hidrodinámico combinado de sedimentos (Wavin) (Fuente: [44])

Por otro lado, si la captación se realizó en pavimentos y/o parqueaderos, es recomendable emplear un separador de hojas/sedimentos denominado "gully". Esta tecnología es empleada para evitar que los sedimentos y contaminantes del agua recolectada en pavimentos y parqueaderos entre a los sistemas de almacenamiento. Funcionan muy parecido al primer separador mostrado en la figura anterior, pero tienen una zona de separación un poco menor, razón por la cual es necesario colocar varios de estos a lo largo de un área de captación. Igualmente, pueden recibir el agua directamente del pavimento mediante un cubrimiento colocado en su parte superior, el cual se encarga de filtrar el agua para retener sólidos más grandes como hojas y desechos. La cantidad de metros cuadrados, o el área de drenaje aferente a cada separador tipo "gully" depende de la naturaleza de la superficie, de la pendiente y de la intensidad de la lluvia. Por ejemplo, para un área de captación construida en asfalto convencional, el área aferente a cada sedimentador varía entre 300 y 400 m². Los separadores tipo "gully" de Wavin tienen cámara de retención de sólidos con una capacidad de 45 litros, para una remoción total de 130 a 140 toneladas de residuos al año, y tienen dimensiones aproximadas de 53 a 83 cm de alto y 40 cm de ancho [87, 88]. En la Figura 6-4 a) se puede observar la instalación convencional de un separador de este tipo y en el esquema b) se puede apreciar una vista exterior, interior y dos cubrimientos típicos de estas tecnologías ofrecidas por Wavin. La operación y mantenimiento de este tipo de separadores es muy sencillo y económico, pero en el Capítulo 7 se profundiza en estos aspectos.

Figura 6-4. Separadores de hojas/sedimentos tipo "gully". a) Gully convencional puesto en campo (Fuente: [88]), b) vista exterior e interior del colector y dos tipos de cubrimientos de un separador de hojas/sedimentos tipo "gully" (Fuente: [88])

Finalmente, si la captación se realizó en una superficie expuesta a aceites y/o hidrocarburos (como una estación petrolera, una gasolinera, etc.) es necesario emplear un separador mucho más especializado que sea capaz de remover estas sustancias. Para eso se emplea un separador de aceites, pero no se va a profundizar en este tipo de estructuras.

3. Sistema de almacenamiento (detention): Corresponde a las unidades modulares ensambladas en las cuales es retenida el agua lluvia proveniente de las estructuras de separación. Es en esencia el elemento más importante y costoso de este tipo de sistemas. Su capacidad de almacenamiento total puede ser tan grande como se quiera hasta alcanzar valores entre 1,500 y 2,500 m³ para macro-proyectos. La unidad de Aquacell (Wavin) es fabricada en polipropileno, es de forma modular (dimensiones 1.0 m x 0.5 m x 0.40 m), liviana (9 kg de peso) y con una capacidad del 95%, es decir de 185 litros. Las unidades de Aquacell son grapadas en capas simples o sobrepuestas en múltiples capas. Cuando se requiere solamente retener el agua, es necesario envolver el sistema modular mediante una geomembrana que evite el intercambio hidráulico suelo/Aquacell. Cuando se busca, además del almacenamiento, infiltración hacia el terreno, se debe envolver en un geotextil especial que permita el intercambio hidráulico entre suelo-Aquacell [84]. En la Figura 6-5 a) se puede apreciar la unidad básica del sistema modular Aquacell con sus respectivas dimensiones. En el esquema b) se encuentra un ejemplo de instalación y ensamblaje de este tipo de estructuras, y en el esquema c) se encuentra un sistema ensamblado con sus respectivos elementos. El sistema de almacenamiento, es decir las unidades modulares, no requieren de ningún tipo de operación y/o mantenimiento (resulta imposible), por lo cual el proceso de separación previo debe ser muy eficiente.

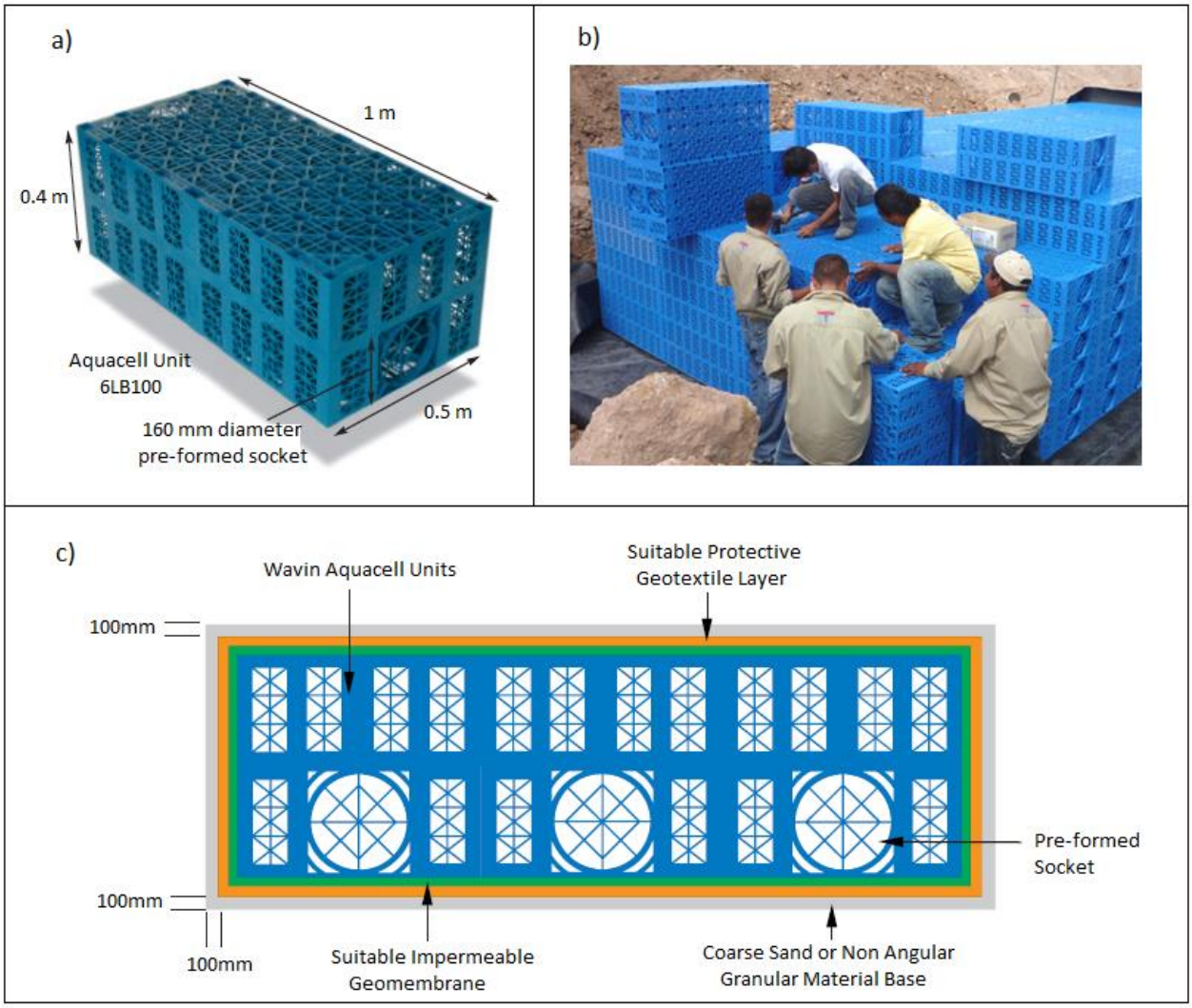


Figura 6-5. a) Unidad básica del sistema Aquacell (Wavin) con sus dimensiones (Fuente: [85]), b) ejemplo de instalación del sistema modular Aquacell (Wavin) (Fuente: [86]), c) componentes básicos de un sistema ensamblado por unidades Aquacell (Wavin) (Fuente: [85])

4. Sistema de entrega o distribución (usage): Corresponde al sistema mediante el cual se va a devolver el agua lluvia al sistema de drenaje (control de escorrentía) o mediante el cual se va a reutilizar dentro del predio (reuso). Para este caso, solo se va a tener en cuenta la utilización de esta tecnología para el manejo de la escorrentía y por lo tanto no se profundiza en aspectos de reutilización. El mecanismo tanto de entrada como de salida corresponde a una cámara de inspección que tiene un mecanismo de control de flujo, mediante el cual el agua entra desde la estructura de separación hacia el elemento de almacenamiento o hacia al sistema de drenaje existente.

   Las cámaras de inspección pueden ser de tipo convencional construidas en concreto in-situ, o pueden ser prefabricadas, siempre y cuando ambas tengan el mecanismo de control de flujo que envía el agua desde y hacia el sistema de almacenamiento modular. En la Figura 6-6 a) se puede apreciar una configuración típica de una cámara construida en concreto colocada justo después del almacenamiento modular Aquacell, y en el esquema b) se encuentra una cámara Novacam-

100, que recomienda emplear Pavco-Wavin para la entrega del agua hacia y desde la retención [87].

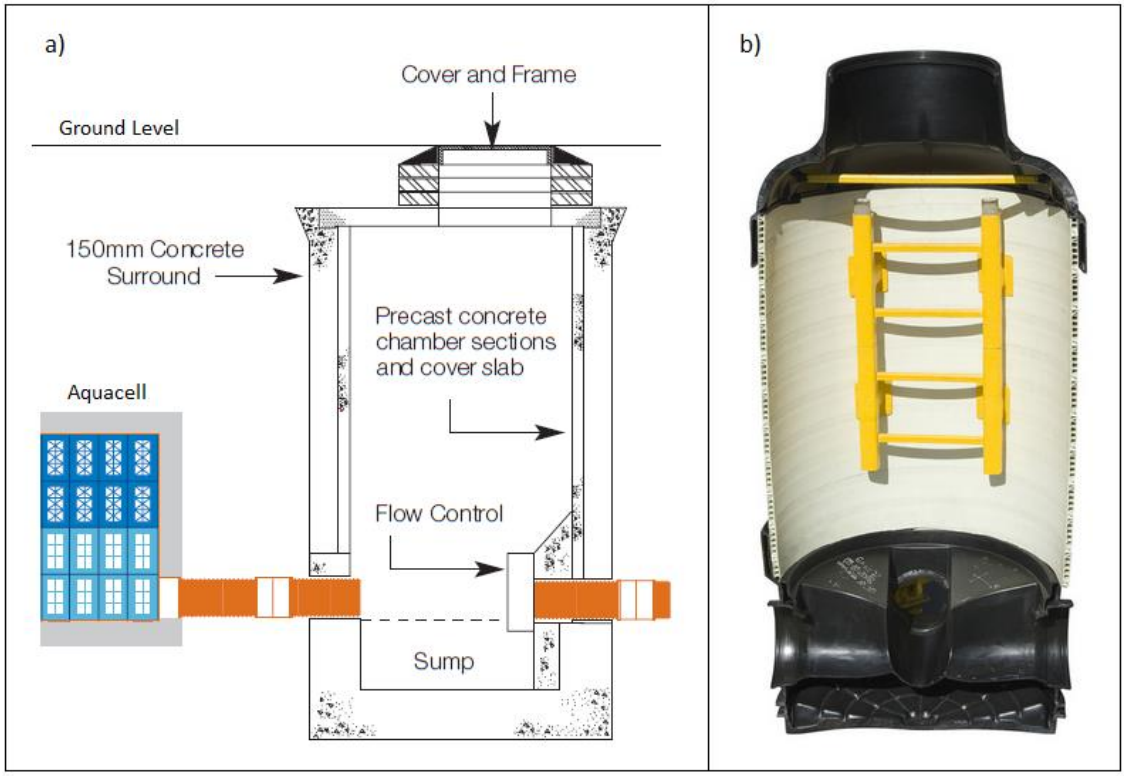


Figura 6-6. Distintos elementos que componen el sistema de entrega en un sistema modular de almacenamiento/infiltración. a) Cámara de inspección tradicional construida en concreto y con un mecanismo de control (Fuente: [85]), b) cámara de inspección Novacam-1000 (Wavin) (Fuente: [89]).

En el Capítulo 7 de este documento se profundiza en los mecanismos direccionados hacia la adecuada operación y mantenimiento de las estructuras de pre tratamiento de los sistemas modulares de retención/infiltración de agua lluvia tales como los separadores pequeños, los separadores hidrodinámicos y los separadores tipo “gully”.

A continuación se mencionan las ventajas y desventajas que presentan este tipo de sistemas.

6.1.2. Ventajas

Las ventajas y/o beneficios que puede generar un sistema modular de almacenamiento/infiltración de agua lluvia son muchas. A continuación se mencionan algunas de las más importantes [85, 86]:

- Al controlar el agua lluvia en la fuente y permitir su infiltración, no solamente se está aliviando el sistema de drenaje tradicional de una cuenca urbana, sino que además, se está beneficiando el medio ambiente local.

- Reducen significativamente los riesgos de inundación en una cuenca urbana altamente impermeabilizada, y las consecuencias que estas situaciones generan, pues tienen una altísima capacidad de almacenamiento.

- Tienen un sistema aeróbico, que junto con la alta sedimentación de material particulado producto del gran volumen de almacenamiento, mejoran significativamente la calidad de la escorrentía urbana después de un evento de lluvia.

- Reducen más eficientemente los volúmenes de escorrentía y las cargas de contaminantes que entran al sistema de drenaje reduciendo así los picos de caudal en eventos fuertes de lluvia y mejorando la calidad del agua.

- Proveen una alta infiltración al suelo natural lo que ocasiona una recarga subterránea muy beneficiosa para la extracción de la misma.

- Corresponden a sistemas sostenibles y costo efectivos para el manejo del agua lluvia, pues son fáciles de instalar, muy resistentes y de alta flexibilidad en su fabricación.

6.1.3. Desventajas

A continuación se mencionan algunas de las desventajas y/o limitaciones que pueden presentar los sistemas modulares de almacenamiento de agua lluvia:

- La capacidad de almacenamiento de estos sistemas necesita estar disponible para cuando se presenta un evento de lluvia, y por esto, muchos de estos pueden resultar ineficientes para temporadas muy lluviosas o para situaciones en las cuales no sean fáciles de vaciar completamente.

- Se debe tener especial cuidado con las características del suelo y de las cargas a las cuales está sometido un sistema modular, pues un mal diseño puede desencadenar una falla estructural del sistema ocasionando una catástrofe.

- Existe un gran número de consideraciones a la hora de ubicar un sistema de almacenamiento modular de agua lluvia, razón por la cual se puede limitar la viabilidad de esta técnica.

- Fugas mal direccionadas de los sistemas modulares pueden generar inestabilidades del terreno causando problemas estructurales.

- El almacenamiento de agua lluvia puede generar un problema si se requiere para consumo humano y no se tienen los sistemas de potabilización requeridos.

- En todos los casos, no pueden ser operados ni mantenidos por el mismo propietario y resultan mucho más costosos de implementar, operar y mantener que los sistemas activos y/o pasivos.

6.2. Consideraciones de Diseño

En este capítulo, se van a analizar los parámetros, criterios y el tren de diseño que se tiene que tener en cuenta para la implementación de un sistema modular de retención/infiltración de agua lluvia.

1. Captación y transporte (collecting)

En primer lugar, es necesario determinar el área de captación. Luego, se calcula el caudal de escorrentía generado por dicha área teniendo en cuenta las consideraciones de diseño necesarias. Finalmente se determina el volumen de escorrentía generada para una lluvia de diseño. Se recomienda emplear el método desarrollado por la NRCS (National Resources Conservation Service) o el método racional modificado para calcular volúmenes y caudales de escorrentía. En el numeral 3.4.1 se encuentra más detallado el procedimiento y las referencias de profundización necesarias para calcular el volumen de escorrentía a almacenar.

En el numeral 3.4.2, se especificaron las consideraciones de diseño a tener en cuenta a la hora de implementar un sistema de recolección y transporte adecuado para el almacenamiento del agua lluvia. Si la captación corresponde a áreas pequeñas, como techos residenciales, es recomendable emplear el sistema de canaletas y bajantes descrito en dicho capítulo. Sin embargo, para los sistemas modulares de almacenamiento/infiltración para los cuales el área de captación es grande (estadios, aeropuertos, escenarios, etc.) es recomendable emplear un sistema de flujo rápido (quickstream system). En la Figura 6-7 a) se puede observar un sistema tradicional de recolección y transporte compuesto por canaletas y bajantes en el cual se genera una mezcla entre aire y agua, lo cual produce vórtices al inicio de las bajantes. Lo anterior causa que la acción sifónica pierda efectividad y el agua llegue mucho más lentamente al elemento de almacenamiento. En el esquema b) se encuentra el sistema de flujo rápido en el cual solo agua fluye a través de las canaletas y bajantes. Allí, no existe mezcla con el aire, lo cual hace que no se generen vórtices al inicio de las bajantes y que la acción sifónica sea mucho más eficiente al transportar el agua más rápido al elemento de almacenamiento [90, 87]. Sin embargo, para pequeñas áreas de captación, la diferencia no es tan notoria y por lo tanto con un sistema convencional es suficiente.

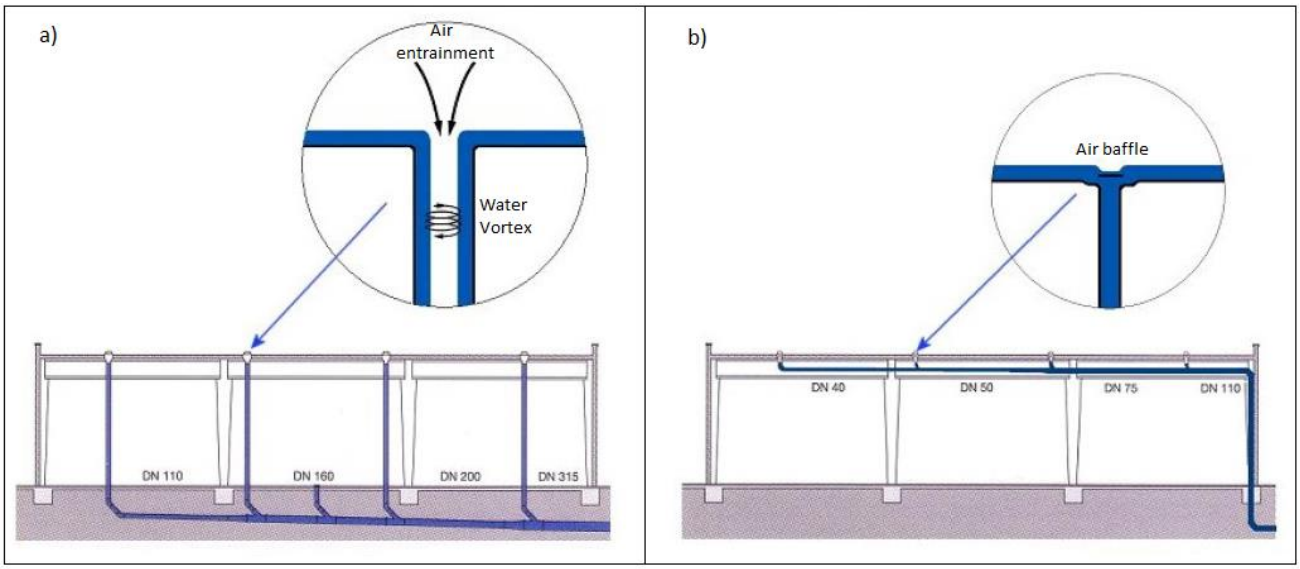


Figura 6-7. a) sistema tradicional de recolección y transporte vs b) sistema de flujo rápido (quickstream system) (Fuente: [90])

Para profundizar en aspectos de diseño del sistema de recolección y transporte de flujo rápido se recomienda revisar el artículo desarrollado por Frans Alferink de Wavin Overseas [90].

2. Separación (separation): Para lograr el óptimo desempeño del sistema de almacenamiento usando las Aquacells (Wavin-Pavco), se requiere de estructuras complementarias que permitan la inspección y limpieza del sistema. Dichas estructuras complementarias básicamente son dos cámaras de inspección, una con el fin de "romper" el flujo (eliminar el vacío producido en el sistema sinfónico y convertir el flujo a superficie libre) y otra con el fin de separar los sedimentos y basuras (estructura que permite la limpieza e inspección) [91, 87]. En la Figura 6-8 se presenta el esquema de conexión (esquema básico de diseño) entre el sistema de recolección y transporte y el de almacenamiento (Aquacell). Al inicio del sistema de recolección y transporte se encuentra el separador de hojas y desechos que elimina la mayor cantidad posible de grandes. Sin embargo, pequeñas partículas sólidas y limos pasan a través de este filtro.

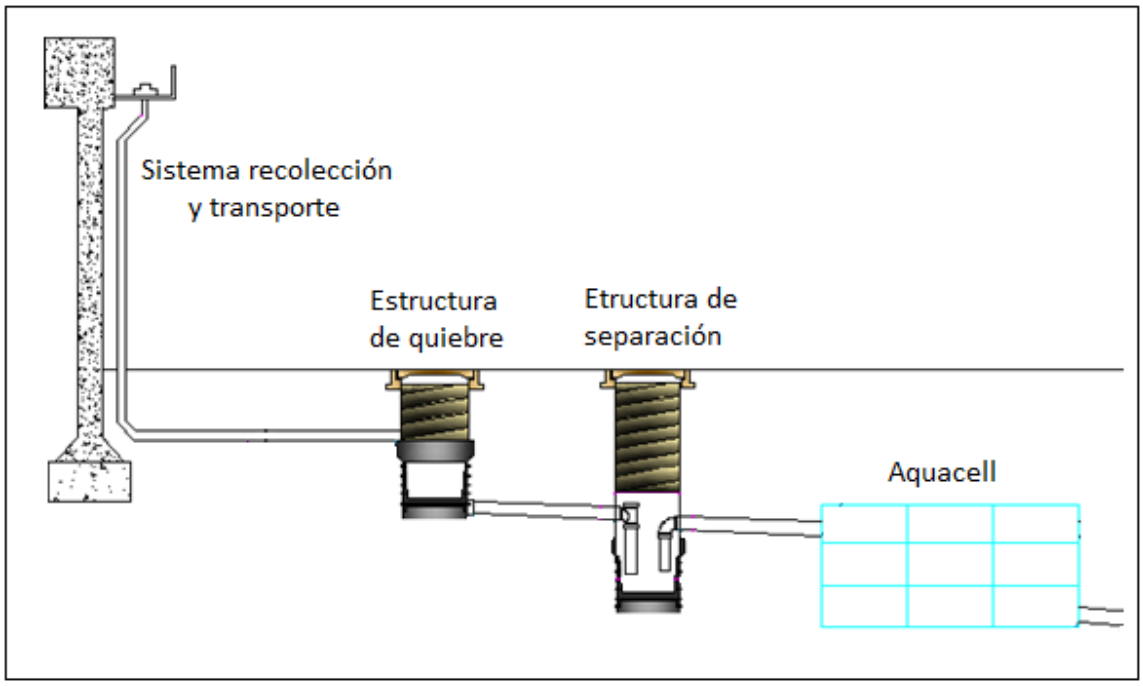


Figura 6-8. Esquema básico de diseño/ubicación de estructuras de quiebre y separación en un sistema modular de retención/infiltración (Adaptada de: [91])

Una vez el flujo a presión atraviesa la bajante, es necesario implementar una cámara de quiebre encargada de romper el vacío generado por el sistema sinfónico, aquietando el flujo y convirtiéndolo a flujo por gravedad. Dicha estructura de quiebre puede corresponder a una cámara de inspección como las que se mencionaron en el capítulo anterior (numeral 6.1.1), y cada bajante debe tener su estructura de quiebre correspondiente. Posteriormente, se tiene una cámara de separación que permite la separación de sólidos. Dicha cámara puede corresponder a una cámara como la anterior de mayor capacidad, o puede corresponder a un separador pequeño o un separador hidrodinámico combinado si la captación se realizó en techos. Si la captación se realizó en pavimento, es recomendable solo emplear separadores tipo "gully" a una distancia según el área aferente (ver numeral 6.1.1 para mayor detalle).

3. Sistema de almacenamiento (detention): Para calcular el número de unidades modulares requeridas para almacenamiento, simplemente es necesario dividir el volumen de escorrentía generado (calculado anteriormente) por la capacidad de una celda (185 L). En lo posible y siempre y cuando haya espacio, se debe buscar una configuración tal que haga que el número de celdas puestas verticalmente sea mínimo, expandiendo lo máximo posible la ubicación horizontal del sistema. Debido a diversas consideraciones de diseño, tales como profundidad mínima y máxima de ubicación, tipo de suelo, carga vehicular, etc., Wavin desarrolló 3 distintos tipos de celdas que deberán ser empleadas dependiendo de las condiciones del sitio y las consideraciones de diseño mencionadas:

    - Aquacell plus: Es la celda de color azul claro, empleada para grandes profundidades o en sitios con gran carga vehicular, pues posee una capacidad de carga mayor. Tiene una capacidad de carga vertical de 65 ton/m² y lateral de 8.55 ton/m² y una profundidad máxima de instalación de las celdas base de 5.08 m.

- Aquacell core: Es la celda de color azul oscuro, empleada para profundidades medias o sitios con carga vehicular moderada, pues posee una capacidad media de carga. Tiene una capacidad de carga vertical de 56 ton/m² y lateral de 7.75 ton/m² y una profundidad máxima de instalación de las celdas base de 4.25 m.

- Aquacell lite: Es la celda de color verde, empleada para profundidades bajas o sitios sin carga vehicular, es decir para zonas verdes o descubiertas, pues posee una capacidad baja de carga. Tiene una capacidad de carga vertical de 17.5 ton/m² y lateral de 4.0 ton/m² y una profundidad máxima de instalación de las celdas base de 1.5 m.

Lo primero que se debe hacer es seleccionar el tipo de celda que se ajusta a las condiciones del sitio en el cual se va a implementar el sistema modular. Para esto, es necesario evaluar los siguientes aspectos de diseño: 1) carga vertical a la cual va a ser sometido el sistema, 2) nivel freático del sitio, 3) geometría del sistema dependiendo de la cantidad de celdas a emplear, 4) profundidad máxima que se requiere (más de 1.5 m o de 4.25 m). En la Figura 6-9 se puede apreciar el tren de selección del tipo de sistema modular a emplear propuesto para el sistema Aquacell desarrollado por Wavin Overseas. Nótese que se puede tener una mezcla de los tres tipos de celdas, siempre y cuando se respeten las profundidades máximas y cargas tanto verticales como horizontales requeridas para cada uno.

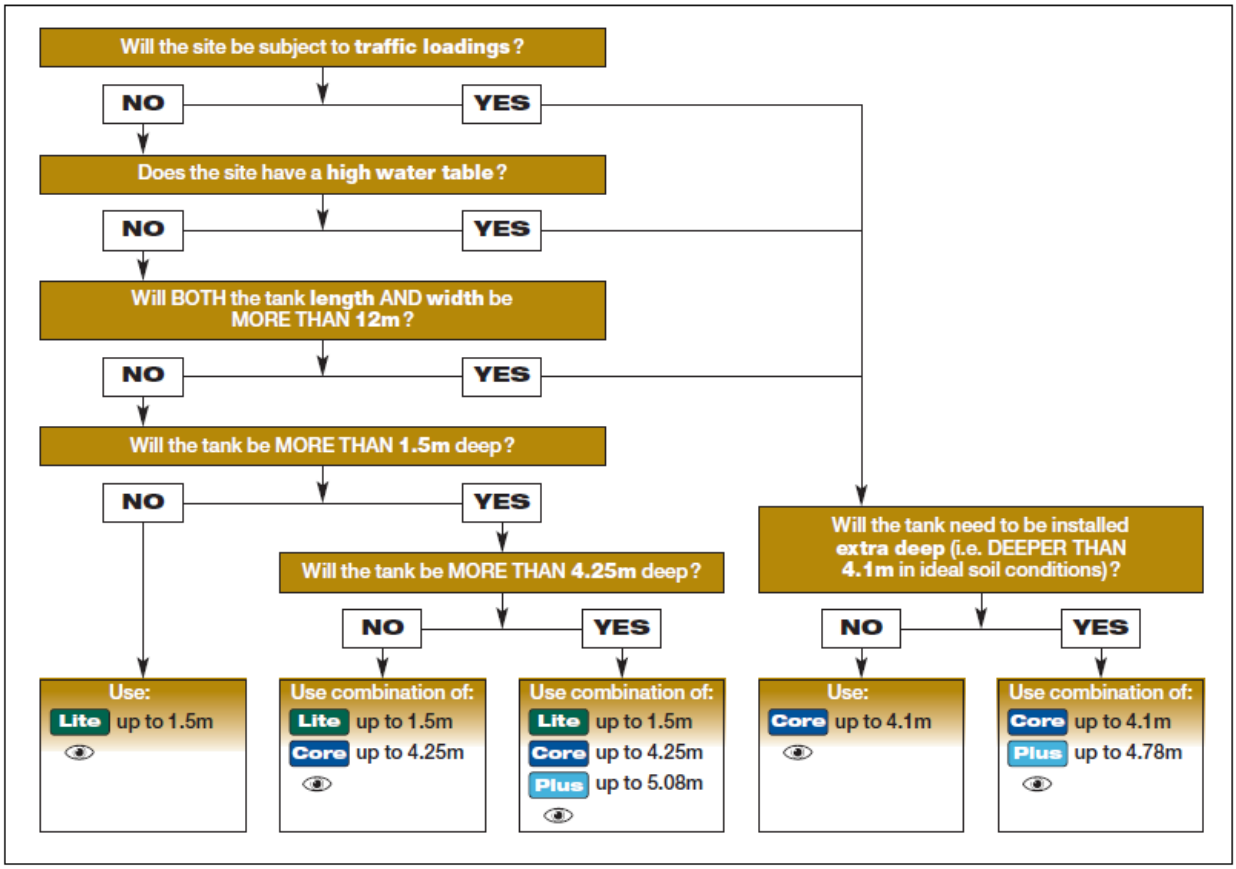


Figura 6-9. Tren de selección del tipo de unidad modular a emplear dependiendo de las consideraciones de diseño del sitio (Fuente: [84])

Luego de seleccionar el tipo de celdas a emplear, es necesario determinar las profundidades a las cuales se van a instalar. Es posible que se tenga una combinación de los tres tipos de celda. Para mayor profundidad se recomienda revisar el manual técnico de la tecnología Aquacell desarrollado por Wavin e implementado en Colombia por Pavco-Mexichem [84].

4. Sistema de entrega o distribución (usage): Existen distintas configuraciones al momento de implementar un sistema modular de almacenamiento/infiltración: 1) configuración de colector (manifold configuration), 2) configuración de caja (box configuration) y 3) configuración de tubería central (central pipe configuration). Igualmente cada una de estas, puede tener la condición de almacenamiento "on-lne" u "of-line" explicados anteriormente. La configuración mayormente empleada es la de colector "on-line", y es la que se ha venido implementando en Colombia, razón por la cual no se va a profundizar en los detalles correspondientes a las demás. A continuación se presenta el esquema típico de una configuración de colector "on-line".

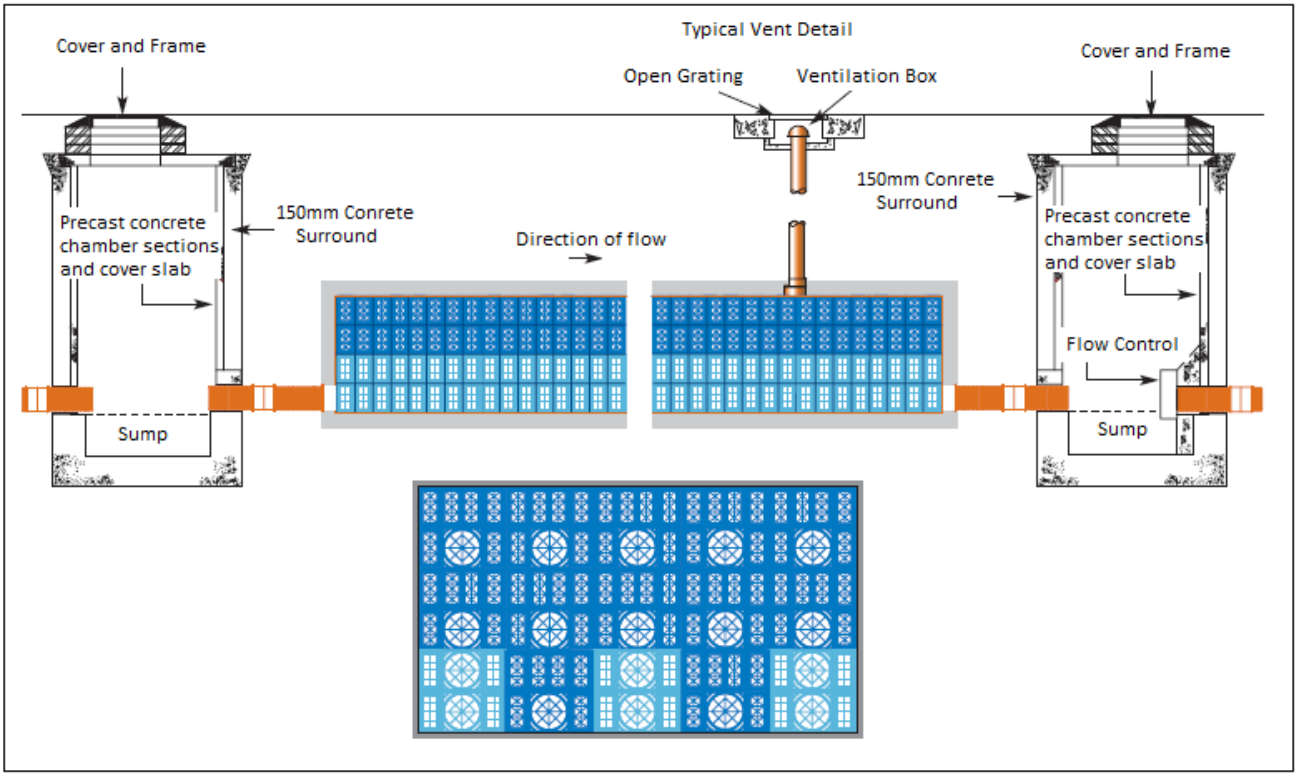


Figura 6-10. Esquema típico de una configuración de colector "on-line" desarrollada por Wavin Overseas (Fuente: [85])

El mecanismo tanto de entrada como de salida corresponde a una cámara de inspección que tiene un mecanismo de control de flujo, mediante el cual el agua entra desde la estructura de separación hacia el elemento de almacenamiento o hacia al sistema de drenaje existente. Las cámaras de inspección pueden ser de tipo convencional construidas en concreto in-situ, o pueden ser prefabricadas, siempre y cuando ambas tengan el mecanismo de control de flujo que envía el agua desde y hacia el sistema de almacenamiento modular.

6.3. Desempeño y Eficiencia

Una vez conocidas las características generales, los componentes y los tipos de sistemas modulares de almacenamiento de agua lluvia (Aquacell), es necesario analizar el desempeño, la eficiencia y la influencia que estas tecnologías presentan en cuanto a la cantidad y calidad del agua lluvia. Se realizó una exhaustiva consulta bibliográfica acerca de estudios que permitieran evaluar el desempeño y eficiencia de este tipo de tecnologías. Lastimosamente, se trata de una práctica muy reciente, y prácticamente no se encuentran estudios específicos académicos, sino estudios realizados por las compañías que implementan este tipo de sistemas los cuales están sesgados por cuestiones comerciales. Aun así, los resultados mostrados en el numeral 5.2 caracterizan bastante bien el desempeño de sistemas modulares, pues en estos se lleva a cabo almacenamiento activo. Es decir, que si dichos estudios cuantificaron la eficiencia en cuanto a calidad y cantidad del agua lluvia para sistemas activos de retención, se esperaría que la eficiencia para sistemas modulares fuera mucho mejor, pues estas tecnologías presentan mayor volumen de almacenamiento y mayores controles de calidad del agua. Lo que si faltaría estudiar en profundidad sería el efecto que tiene la infiltración en los sistemas modulares, pues no se encontró bibliografía que la caracterizara.

A pesar de lo anterior, Frans Alferink e Inés Elvira Wills (altos funcionarios de Wavin Overseas y Pavco-Mexichem) [87], muy cordialmente suministraron un par de estudios realizados por ellos, pero que por cuestiones de confidencialidad no se detallan en este capítulo. Sin embargo, las conclusiones más importantes a las que se puede llegar en cuanto al desempeño de los sistemas modulares de retención/infiltración se resumen a continuación:

- Los sistemas modulares de almacenamiento activo tienen la mayor influencia en la reducción de volumen de escorrentía y picos de caudal, hasta del 100% para lluvias no tan intensas, y cerca de los 30-40% para lluvias con periodos de retorno muy altos si se aplican masivamente a una cuenca urbana de drenaje. Dichas reducciones dependen de muchos factores como el tamaño del almacenamiento, el área impermeable de la cuenca, el periodo seco antecedente, y la escala de implementación, etc.

- Es de esperarse que a medida que incrementa la intensidad y duración de la lluvia, la eficiencia de los sistemas modulares de retención se reduzca, pero a una tasa mucho menor a la cual decrece la eficiencia de los sistemas de alamcenamiento activo. Lo anterior permite concluir, que los sistemas modulares, resultan en una técnica mucho más efectiva que el almacenamiento activo, si ambos se aplican masivamente a una cuenca urbana de drenaje.

- Los sistemas modulares de almacenamiento/infiltración resultan en la mejor alternativa cuando se tienen áreas de captación muy grandes, o para localizaciones en las cuales se tiene un régimen hidrológico con lluvias de gran intensidad y/o duración.

- Existe un impacto considerable en el mejoramiento de la calidad del agua almacenada que llega al sistema de drenaje debido al gran volumen de almacenamiento que se puede tener en un sistema modular de detención/infiltración. Por otro lado, los sistemas de pre-tratamiento corresponden a tecnologías muy sofisticadas mediante las cuales se obtiene una calidad del agua superior a la que se puede alcanzar con el almacenamiento activo.

- El porcentaje de reducción en cuanto a TSS, TN y TP no depende del tamaño del tanque a diferencia de los sistemas activos, los cuales mejoran su reducción a medida que hay más capacidad de almacenamiento. Por otro lado, las reducciones de contaminantes en los sistemas modulares dependen directamente de la eficiencia y cantidad de estructuras de pre-tratamiento (separación) que se tengan

- El agua almacenada en un sistema modular de retención/infiltración puede constituir en una fuente de agua limpia, segura y confiable siempre y cuando se tenga en consideración un tren de tratamiento posterior al almacenamiento.

- Es necesario profundizar en cuanto a la eficiencia en cantidad y calidad de la escorrentía atenuada de los sistemas modulares de retención/infiltración, pues no existe bibliografía específica sobre todo en cuanto al fenómeno de infiltración que presenta este tipo de tecnología.

7. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En este capítulo se van a mencionar los procedimientos y prácticas necesarias para asegurar una buena operación y mantenimiento de los sistemas de retención de agua lluvia a nivel predial. Dado que cada tipo de sistema (pasivo, activo y modular) tiene sus propias características, es necesario analizarlos por separado.

7.1. Almacenamiento Pasivo

Los barriles de agua lluvia pueden ser fabricados por el mismo beneficiario, o pueden ser adquiridos comercialmente. Para el primer caso, existen numerosas guías oficiales, que contienen información precisa de cómo construir un barril propio. Para el segundo caso, existen en Estados Unidos numerosos programas y campañas que entregan y venden barriles de lluvia a los propietarios de los predios, o pueden conseguirse comercialmente mediante fabricantes certificados para tal fin. En general, y sea cual sea la opción de instalación, los sistemas de almacenamiento pasivo (barriles de lluvia) requieren de muy poca operación y mantenimiento, y todo debe llevarse a cabo por el propietario del predio [57]. De acuerdo a la literatura consultada, guías, manuales y estudios [57, 69, 71, 70], la operación y mantenimiento que debe llevarse a cabo para un adecuado manejo de los barriles de agua lluvia se resume a continuación:

- Anualmente, se debe vaciar y limpiar el interior del barril de agua lluvia mediante un limpiador que no sea tóxico. Se debe limpiar adecuadamente las paredes, el fondo y las salidas del mismo.

- Regularmente, es recomendado chequear las pantallas/filtro de desecho, hojas y mosquitos. Se debe verificar que no existan huecos o aberturas, y que esté debidamente sellado para que no se permita la entrada de este tipo de agentes. De igual forma, es necesario realizar un mantenimiento regular de estas estructuras para evitar estancamientos o crecimiento de mosquitos o algas. Por otra parte, dos veces al año (una antes y otra durante la temporada de lluvias) se deben limpiar los componentes del sistema de transporte y recolección (canaletas y bajantes) para asegurar su buen funcionamiento durante el año.

- Después de cada evento de lluvia, es necesario vaciar el barril de lluvia y el desviador de primer lavado (en caso de contar con uno) con el fin de prepararlo para el siguiente evento. Para ello, se debe operar el mecanismo de salida (a través de un grifo o manguera) el cual se encuentra en la parte inferior de dichas estructuras.

- Anualmente, es recomendado revisar el mecanismo de desbordamiento del barril, y el sitio al cual se está dirigiendo el agua sobrante. Lo anterior se realiza con el fin de evitar que se estén presentando fugas, o que el agua esté impactando algún elemento estructural circundante.

- Para temporadas de invierno, los barriles de lluvia no funcionan. Por lo anterior, deben ser vaciados y guardados adentro del establecimiento antes de la llegada del invierno para evitar daños estructurales del mismo.

- Durante la instalación o construcción, asegurarse que el interior del barril no quedó expuesto y que los materiales del barril no permiten la entrada de luz solar. Lo anterior es muy importante para evitar el crecimiento de algas en el interior de este, lo cual empeoraría la calidad del agua y las estructuras de salida.

- Durante la instalación o construcción es necesario verificar que el filtro para desechos y mosquitos quedó correctamente instalado y funciona adecuadamente para prevenir el florecimiento de vectores dentro del barril. Si el barril se ubica en localizaciones con problemas de mosquitos (trópico), es necesario ubicar tabletas larvicidas en su interior, las cuales evitan el crecimiento de vectores y son inofensivas para la calidad del agua y/o la salud humana.

- Si se emplea un barril comercial, verificar y aplicar los lineamientos recomendados por el fabricante sobre aspectos de operación y mantenimiento.

7.2. Almacenamiento Activo

Básicamente, para los sistemas activos de retención de agua lluvia, se deben seguir los mismos lineamientos que los sistemas pasivos en cuanto a su operación y mantenimiento. Aun así, y dado que los sistemas activo son de mayor tamaño y pueden estar constituidos de más elementos, algún tipo de operación y/o mantenimiento adicional puede llevarse a cabo dependiendo del diseño del sistema. Por ejemplo, y a diferencia de los sistemas pasivos, los dispositivos de retención activa, aparte del desviador de primer lavado, requieren de algún mecanismo pre tratamiento (tanques sedimentadores y/o filtros de vórtice). Este tipo de estructuras requieren de una inspección periódica para asegurar su buen funcionamiento. De igual forma, y teniendo en cuenta que los sistemas activos proveen mayor volumen de almacenamiento lo cual puede generar problemas de crecimiento de algas o bacterias, es necesario emplear dispositivos de aireación [57].

Igualmente, se recomienda inspección periódica del tanque o cisterna y una adecuada desinfección dependiendo del diseño del sistema. Para casos en los cuales exista reutilización del agua o bombeo, es necesario realizar el adecuado mantenimiento a la(s) bomba(s) involucrada(s) dependiendo del tipo, configuración y regularidad de operación de la(s) misma(s). También existen consideraciones importantes para el sistema de potabilización o de pos tratamiento, pero no es de interés en este documento.

De acuerdo a la literatura consultada, guías, manuales y estudios [57, 92, 93], la operación y mantenimiento que debe llevarse a cabo para un adecuado manejo de los sistemas activos de almacenamiento de agua lluvia se resume a continuación:

Tabla 7-1. Resumen de la operación y mantenimiento para sistemas activos de almacenamiento (Adaptada de: [57, 93])

Actividad	Operación	Frecuencia
Vaciar el desviador de primer lavado operando su mecanismo de salida (grifo o manguera)	D	Después de cada evento de lluvia
Limpiar e inspeccionar los componentes del sistema de transporte y recolección (canaletas y bajantes)	D	2 veces al año
Limpiar e inspeccionar las pantallas/filtro de desecho, hojas y mosquitos y el desviador de primer lavado	D	4 veces al año
Revisar el mecanismo de desbordamiento del tanque/cisterna y el sitio al cual se está dirigiendo el agua sobrante	D	1 vez al año
Vaciar y limpiar los accesorios del tanque/cisterna mediante un limpiador/desinfectante que no sea tóxico	D	1 vez al año
Drenar, limpiar e inspeccionar las tuberías de entrada, de salida y el mecanismo de desbordamiento	D	1 vez al año
Limpiar e inspeccionar la formación de sedimentos que puedan taponar o reducir la capacidad del tanque/cisterna	AE/D	1 vez al año
Limpiar e inspeccionar las estructuras de pre-tratamiento tales como los tanques sedimentadores o los filtros de vórtice	AE	1 vez al año
En caso de presentar problemas con insectos o roedores, realizar el respectivo control pesticida	AE	1 vez al año
Cortar hojas y ramas que puedan estar encima del área de captación	AE	1 vez cada 3 años
Inspeccionar la integridad estructural del tanque, sistema de bombeo y sistema eléctrico	AE	1 vez cada 3 años
Remover y sustituir elementos dañados del sistema	AE	1 vez cada 3 años
En caso de ser tanque/cisterna sub superficial, inspeccionar estabilidad del terreno (raíces, fugas, inestabilidades, etc.)	AE	1 vez cada 3 años

La tabla anterior resumen los cuidados de operación y mantenimiento que se deben tener en cuenta si se cuenta con un sistema activo de almacenamiento de agua lluvia mediante tanque(s) o cisterna(s). La segunda columna corresponde al encargado de realizar dicha labor. La letra "D" corresponde al dueño del predio, mientras que las letras "AE" corresponden a un agente externo, que bien puede ser la empresa prestadora del servicio de agua y saneamiento básico o una empresa independiente certificada por las regulaciones. Nótese que en esencia, el dueño de un predio debe tener los mismos cuidados de operación y mantenimiento que para los sistemas pasivos. Aun así, se requiere de cierta ayuda especializada cuando se trata de otros aspectos u elementos adicionales que tiene este tipo de sistema con respecto al anterior. De todas formas, resulta una práctica relativamente fácil y económica de operar y mantener.

7.3. Nuevas Tecnologías Retención/Infiltración (Aquacell)

Los sistemas modulares de retención/infiltración requieren de una operación y mantenimiento muy específico para asegurar su buen desempeño. En cuanto al área de captación y al sistema de recolección y transporte, se deben seguir en general los mismos lineamientos de operación y mantenimiento que los sistemas pasivos y activos de almacenamiento, es decir que regularmente, es recomendado chequear las pantallas/filtro de desecho, hojas y mosquitos. Se debe verificar que no existan huecos o aberturas, y que estén debidamente sellados para que no se permita la entrada de este tipo de agentes. De igual forma, es necesario realizar un mantenimiento regular de estas estructuras para evitar estancamientos o crecimiento de mosquitos o algas. Por otra parte, dos veces al año (una antes y otra durante la temporada de lluvias) se deben limpiar los componentes del sistema de transporte y recolección (canaletas y bajantes) para asegurar su buen funcionamiento durante el año.

Para las estructuras de pre tratamiento se requiere de un trato especial. Independientemente del tipo de separador que se emplee (separador pequeño, separador hidrodinámico combinado o separador tipo "gully"), el mantenimiento a estas estructuras debe realizarse periódicamente (después de un evento de lluvia significativo) y mediante un agente externo al dueño del predio. Dicho agente puede ser una empresa certificada dedicada a la limpieza de elementos de los sistemas de acueducto y saneamiento básico, o la misma empresa prestadora del servicio. Generalmente se emplea un camión tipo Vactor, un equipo de succión móvil que en pocos segundos y a un costo de €0.40 por año por separador, remueve los sedimentos y desechos que pueden taponarlos [87]. Estos camiones pueden remover entre 130 a 160 toneladas de sedimentos/desechos por año. Es indispensable que se mantengan e inspeccionen los separadores regularmente, pues son estas estructuras las encargadas de darle un buen funcionamiento y desempeño al sistema modular de almacenamiento; si éstas se empiezan a taponar, el sistema puede colapsar. A las celdas ensambladas no les debe entrar agua contaminada o con alta carga particulada, pues esto haría que se sedimenten en el fondo, reduciendo la tasa de infiltración, la capacidad de almacenamiento y la calidad del agua dentro de estas.

En cuanto a la estructura de almacenamiento, es decir las celdas ensambladas, no se debe hacer ningún tipo de mantenimiento. Dadas las características de estos sistemas y a la falta de espacio, resulta prácticamente imposible intentar cualquier tipo de intervención. Lo anterior, es la razón por la cual las estructuras de pre tratamiento deben funcionar adecuadamente durante toda la vida útil del sistema, pues deben asegurar que no entre material particulado dentro de las celdas. Aun así, se puede realizar una inspección mediante un circuito cerrado de televisión (CCTV) en cada cámara de inspección que llegue al sistema de almacenamiento. Es recomendable hacer este tipo de práctica después de cada evento de lluvia significativo o regularmente dependiendo de las condiciones del sitio, pues de esta forma se regula el desempeño y se controla la eficiencia de estos sistemas modulares de retención/infiltración [84].

En cuanto al mecanismo de desbordamiento y entrega, anualmente es recomendado mantenerlo e inspeccionar el sitio al cual se está dirigiendo el agua sobrante. Lo anterior se realiza con el fin de evitar que se estén presentando fugas, o que el agua esté impactando algún elemento estructural circundante. En general, las prácticas de inspección y mantenimiento de esta estructura corresponden a las mismas mencionadas anteriormente para los sistemas pasivos y activos.

8. CASOS Y EXPERIENCIAS REALES DE APLICACIÓN

En los Estados Unidos, al igual que en muchos otros países desarrollados del mundo, durante muchos años se enfocó la legislación en materia de drenaje urbano al problema de las inundaciones. Aun así, en la década de los 70s se reconoció el problema de la contaminación de la escorrentía, reflejando en 1987 esta problemática en la *Clean Water Act*, que derivó en programas específicos de actuación para resolver este problema. La progresiva concienciación durante las dos últimas décadas de la necesidad de mejorar la calidad de las aguas condujo a la aparición del concepto de *Best Management Practices* (BMPs) [41]. Desde el desarrollo de las BMPs, varios estados y gobiernos locales han adoptado un gran número de leyes, normativas y legislación para fomentarlos u obligar a su utilización. Un proceso similar se produjo en Australia a finales de la década de los 90, país que cuenta actualmente con normativa, legislación y manuales de diseño propios.

En Europa, la gestión de la escorrentía urbana se ha centrado en el control de las inundaciones, y no ha sido sino hasta hace aproximadamente una década cuando se ha empezado a tomar conciencia del problema de la contaminación de la escorrentía y crecimiento en los volúmenes de agua [41]. A partir de entonces, se comenzaron a adoptar criterios combinados de cantidad y calidad, y se empezaron a regular normativas y prácticas sostenibles para el manejo del agua lluvia.

En Colombia, y en general en Latinoamérica, el manejo sostenible de la escorrentía urbana mediante la implementación de las SMPs (SUDs, BMPs y LIDs), ha sido muy poca y en algunos casos inexistentes. Actualmente no se cuenta con una normativa o legislación que apruebe su instalación y manejo, o que obligue a la ciudadanía y/o empresas urbanísticas a aplicar su práctica. En mucha menor proporción en cuanto a la práctica específica del almacenamiento/retención del agua lluvia a nivel predial. Es un tema muy nuevo para esta parte del mundo, y por lo tanto se debe aprender de la experiencia de zonas más desarrolladas del planeta que ya han venido implementando estos sistemas durante algunos años. De acuerdo a lo anterior, a continuación se van a mencionar algunos casos o experiencias reales de aplicación de estas tecnologías que se han reportado en la literatura. La idea es poder apreciar que la práctica del almacenamiento/retención del agua lluvia a nivel predial es algo real, que se ha venido aplicando en muchas otras partes del mundo, y que es algo de lo cual se puede aprender para su futura implementación en Latinoamérica, especialmente en Colombia.

8.1. Almacenamiento Pasivo

La práctica de retención del agua lluvia mediante barriles (almacenamiento pasivo) es una práctica que debe ser implementada masivamente para obtener beneficios en cuanto al control de la escorrentía en una cuenca urbana de drenaje. Si bien es cierto que cualquier dueño de un predio puede fabricar su propio barril de lluvia (existen numerosas guías técnicas para su construcción), en esta sección se van a discutir los programas implementados por autoridades locales para lograr su masificación.

Seattle - King County

En la ciudad de Seattle ubicada en el condado King del estado de Washington se lleva a cabo un programa de barriles de agua lluvia para reducir el exceso de volumen de escorrentía que se presenta en la ciudad. En la página oficial de la oficina de sostenibilidad y ambiente (Office of Sustainability and Environment)[17] se encuentra detallado el programa. En dicho programa se encuentra toda la información que un ciudadano necesita saber para su implementación y correcto funcionamiento, los beneficios económicos, ambientales y sociales (educación) e incluso se ofrecen recompensas económicas (reducción del servicio de agua) por su implementación. Por otra parte, se ofrecen los mismos barriles para su compra, o se recomiendan las compañías mediante las cuales las personas pueden adquirir el suyo. En un estudio desarrollado por el departamento de recursos naturales del contado de King (King County Department of Natural Resources) [94], se caracterizan las condiciones hidrológicas y medioambientales anteriores a la puesta en marcha del programa de barriles de lluvia, y de alguna forma se intenta evaluar su posible efecto y eficiencia en cuanto a la reducción de volúmenes de escorrentía.

Cumberland County – Pennsylvania

De igual forma, en el condado de Cumberland del estado de Pennsylvania, se implementó un proyecto de barriles de agua lluvia similar al anterior. El proyecto consiste en que cada año, el distrito de conservación del condado de County construye cierto número de barriles de agua lluvia (55 galones cada uno) y los distribuye entre los ciudadanos, incentivándolos económicamente mediante reducciones en las tarifas del servicio de agua y saneamiento básico. De igual forma, el programa incluye la propia fabricación del barril, y para esto se encuentran en la página del distrito de conservación del condado de Cumberland (Cumberland County Conservation District)[18], los documentos necesarios que un ciudadano común y corriente puede leer para construir su propio barril. Asimismo se encuentra un documento guía, mediante el cual se especifica el valor económico de construir un propio barril. De igual forma se encuentran documentos que incentivan y educan al ciudadano en cuanto a los diversos beneficios que traen consigo las prácticas para la recolección y almacenamiento del agua lluvia.

Cedar Rapids – Iowa

Las inundaciones del 2008 han sido uno de los peores desastres naturales de los últimos 30 años de la historia de los Estados Unidos. La ciudad de Cedar Rapids no fue la excepción, pues el agua cubrió el 14% de la ciudad y dejó a más de 10,000 damnificados. Aunque esta ciudad, la segunda más grande del estado de Iowa, ha intentado lo imposible para recuperarse de esta situación, no ha sido

[17] Office of Sustainability and Environment. Disponible en línea en: https://www.seattle.gov/dpd/GreenBuilding/Resources/TechnicalBriefs/DPDP_021935.asp. Consultada el 6 de Diciembre de 2013.

[18] Cumberland County Conservation District. Disponible en línea en: http://www.cumberlandcd.com/rainbarrel.html. Consultada el 6 de Diciembre de 2013.

del todo fácil, pues su topografía y sistema de drenaje ya no dan abasto con los volúmenes crecientes de agua lluvia.

Con el fin de educar a los ciudadanos acerca de la importancia de las prácticas LID aplicadas a nivel predial, para la reducción de volúmenes de escorrentía y alivio del sistema de drenaje de la ciudad, el Indian Creek Natural Center[19] creó un programa llamado "Every Gallon Counts" en el 2010. Fue tal la promoción del programa, que después de los primeros 3 meses ya se habían vendido más de 600 barriles de lluvia y se estaban empezando a ver los resultados. Adicionalmente, este programa empleó una campaña educativa recordándole a los ciudadanos de Cedar Rapids que podían tomar un rol activo para reducir la escorrentía urbana de sus propiedades empleando barriles de lluvia, pavimentos porosos y jardines de lluvia. Finalmente, la masificación de estas prácticas LID se vio reflejada, pues hasta el momento nunca se ha vuelto a presenta run desastre asociado a inundaciones.

Oakland – California

La cuenca urbana de Oakland, California cuenta con la laguna de Merrit. En el 2009, la laguna fue listada como una de las más deterioradas de la región debido a su gran concentración de nutrientes, bajo nivel de oxígeno disuelto y altos niveles de desechos. Los desechos que entraban a la laguna lo hacían principalmente a través del canal que conducía la escorrentía urbana. Apenas se listó la laguna, The Clean Water Act le estableció a la ciudad de Oakland una carga diaria mínima de contaminantes. Forzados a cumplir estos requerimientos, la ciudad de Oakland mediante el Oakland Watershed & Stormwater Mangement Rain Barrel Program[20], lanzó un programa de barriles de agua lluvia con el fin de mejorar la escorrentía urbana.

Se realizó una promoción de barriles de lluvia con el fin de que los ciudadanos los pudieran adquirir a un bajo costo, y adicionalmente se incentivó económicamente a la población mediante reducciones en las tarifas de los servicios de saneamiento básico. En los primeros 16 meses, se vendieron más de 1,200 barriles de lluvia. El programa tenía la suficiente documentación para enseñarle a los usuarios a cómo instalar, mantener y operar su barril. Luego de su masificación se empezaron a ver los resultados: para cada evento de lluvia se recolectan 80,000 galones de agua lluvia (sobre todo de primer lavado) que ayudaron a la laguna de Merritt a recuperar sus condiciones aeróbicas y salir de la lista de las lagunas en estado crítico por su contaminación.

8.2. Almacenamiento Activo

A continuación se van a mostrar algunos casos de aplicación de los sistemas de almacenamiento activo (tanques y cisternas), la mayoría de los cuales fueron extraídos del manual de almacenamiento de agua lluvia del estado de Texas y de Virginia, USA [53, 95].

[19] Creek Natural Center. Disponible en línea en: http://www.indiancreeknaturecenter.org/creekside-shop/rain-barrels-accessories/. Consultada el 6 de Diciembre de 2013.
[20] City of Oakland, Rain Barrel Program. Disponible en línea en: http://www2.oaklandnet.com/Government/o/PWA/o/FE/s/ID/OAK025822. Consultada el 6 de Diciembre de 2013.

J.M. Auld Lifetime Learning Center – Kerrvile, Texas

El instituto educativo, J.M. Auld Lifetime Learning Center, implementó en el 2003 dos tanques de concreto con capacidad de 3,300 galones cada uno para recolectar agua lluvia de escorrentía de sus techos con un área aproximada de 5,000 pies cuadrados. Los tanques fueron colocados en la parte trasera del establecimiento, y conectada a una tubería de 3 pulgadas, encargada de traer el agua recolectada de los techos. Igualmente, se instalaron desviadores de primer lavado en cada esquina del sistema de transporte y recolección, con el fin de capturar los sedimentos y contaminantes principales derivados del primer lavado.

El agua lluvia almacenada, sirve para irrigación de jardines circundantes y para la reducción de volúmenes de escorrentía. El costo total de haber implementado este sistema fue cercano a los $10,500, de los cuales ambos tanques costaron $4,766, la mano de obra $2,800, el equipo y tanque de bombeo $1,535 y el sistema de canaletas y bajantes $541, entre otros costos.

Lady Bird Johnson Wildflower Center – Austin, Texas

El agua recolectada de tres diferentes áreas de captación provee cerca del 15% del agua necesaria para irrigación de jardines del Lady Bird Johnson Wildflower Center en la ciudad de Austin, Texas. El área de captación de este sistema de recolección y almacenamiento de agua es de 17,000 pies cuadrados y puede almacenar más de 70,000 galones de agua mediante cisternas superficiales. Uno de los componentes más admirables de este sistema es la cisterna de 43 pies de altitud y 5,000 galones de capacidad construida en piedra nativa (ver Figura 8-1 a).

Los techos, construidos en metal, recolectan el agua de los 17,000 pies cuadrados y la drenan hacia la cisterna de 5,000 galones y a dos tanques más de 25,000 galones de capacidad cada uno, obteniendo un almacenamiento anual promedio de 300,000 galones de agua lluvia. Un sistema presurizado de distribución, dirige el agua lluvia de los tanques hacia actividades de irrigación.

Claude Moore Educational Complex - Roanoke, Virginia

El establecimiento comercial Claude Moore Educational Complex, necesitaba ser renovado. El diseñador de la renovación se encontró con aspectos y retos muy importantes que tenía que solucionar. Una de estas preocupaciones era el poco presupuesto y espacio con el que contaba, y el otro era que debía implementar un sistema de almacenamiento de agua lluvia con el fin de cumplir con los requerimientos de drenaje de la ciudad. Adicionalmente, solo una pequeña parte del sistema de recolección y transporte del agua lluvia podía ser comprada, es decir que se debía ubicar el sistema teniendo en cuenta las canaletas y bajantes existentes. Por otro lado, las autoridades de la ciudad tenía dentro de su regulación, que cada predio comercial debía contar con un sistema de manejo del agua lluvia que se ajustara a los requerimientos de espacio, y que además fuera eficiente en la reducción de escorrentía urbana y contaminantes.

Para solucionar los anteriores inconvenientes se empleó un sistema sifónico para la recolección y transporte del agua lluvia. El empleo de este tipo de sistema, a comparación del convencional, permitió llevar toda el agua a un mismo sitio sin necesidad de instalar más tuberías. El agua lluvia

fue filtrada mediante filtros de vórtice antes de su entrada a las estructuras de almacenamiento, las cuales correspondieron a dos tanques sub superficiales de polietileno de 2,500 galones de capacidad (ver Figura 8-1 b). El agua lluvia retenida fue empleada para aliviar los volúmenes de escorrentía, y para suplir demanda interna de agua (baños y lavandería). Actualmente, el lugar en el cual se implementaron los tanques corresponde a una zona de esparcimiento, lo cual refleja la eficiencia del almacenamiento activo sub superficial instalado en sitios con poco espacio.

Figura 8-1. a) Sistema de almacenamiento activo del Lady Bird Johnson Wildflower Center – Austin, Texas (Fuente: [53]), b) sistema de almacenamiento activo del Claude Moore Educational Complex – Roanoke, Virginia (Fuente: [95]) y c)

Complejo multifamiliar Charlottesville – Virginia

La administración de un complejo de viviendas multifamiliares propuso un sistema de recolección/almacenamiento del agua para suplir necesidades de irrigación y atenuar los volúmenes de escorrentía. En lugar de tener que pagar por agua adicional, la administración decidió implementar en cada casa uno de estos sistemas. Los retos para su diseño fueron básicamente dos: 1) debido a que las propiedades son privadas, los dueños de éstas deberían estar en capacidad de operar y mantener los sistemas en caso de ser necesario, y 2) los tanques tendrían que ser puestos de tal forma que no interfieran con el espacio y la arquitectura de las casas.

Se implementaron tanques de almacenamiento en cada casa con una capacidad de 1,000 galones cada uno, recolectando agua de la mitad de los techos mediante una canaleta y una bajante, y un desviador de primer lavado. Los tanques seleccionados se ajustaban a los retos del diseño, puesto que eran de un tamaño tal que no bloqueaban ningún espacio y eran estéticamente adecuados. Los mecanismos de desbordamiento fueron instalados sub superficialmente, y dirigidos a un mismo tanque colector mediante el cual (empelando una bomba) se realizó la irrigación del complejo.

Brazilian Ball Pre-Filter System

En una zona rural de Brasil, se llevó a cabo la construcción de un sistema activo de almacenamiento de agua lluvia, el cual buscaba explicar el sistema de pre retratamiento o de primer lavado mediante la bola flotante. Para dicho proyecto, se recolectó el agua lluvia de un establecimiento rural mediante canaletas y bajantes, para luego ser transmitida hacia un desviador de primer lavado. El elemento de almacenamiento correspondía a un tanque de 1,500 galones fabricado en fibra de vidrio y a partir del cual se extraía agua para suplir necesidades domésticas tales como irrigación de jardines, lavado y

baños (ver Figura 8-1 c). En el reporte final de dicho proyecto [63], se encuentra mayor información acerca de los detalles técnicos del mismo.

8.3. Nuevas Tecnologías Retención/Infiltración (Aquacell)

La experiencia en la implementación de los sistemas modulares de retención/infiltración de agua lluvia se ha dado más que todo en países desarrollados (Estados Unidos y Europa). El desarrollo que estas tecnologías han tenido en Latinoamérica (especialmente Colombia), ha sido muy poca y prácticamente inexistente. Por esta razón, inicialmente se analizarán algunos de los proyectos más relevantes que ha desempeñado Wavin Overseas[21] alrededor del mundo mediante su tecnología Aquacell [84, 86]. Específicamente en Colombia, algunas empresas como Pavco – Mexichem[22] y Atlantis[23], han venido dando los primero pasos en cuanto al diseño e instalación de estos sistemas, razón por la cual posteriormente se mencionarán algunos de sus proyectos. Por cuestiones de confidencialidad no se profundiza mucho en estos proyectos [87].

Estadios de Futbol en Alemania (Frankfurter Waldstadion y Olympiastadion de Berlín)

El estadio de Frankfurt fue remodelado en el 2005 para servir de sede al mundial que se realizó en Alemania en el 2006. El techo del estadio, con un área de captación de 25,000 m², fue restaurado mediante el sistema QuickStream de acción sifónica, mediante el cual se aseguró que el agua se evacuara muy eficientemente tanto de la cancha como de las tribunas del estadio. Igualmente, en lugar de evacuar toda esta cantidad de agua directamente hacia el sistema de drenaje, se instalaron 9,000 unidades modulares de Aquacell, para un volumen total de almacenamiento de 1,712 m³, y que se emplearon para almacenar e infiltrar el agua (ver Figura 8-2 a).

De igual forma, Wavin Overseas implementó un sistema de almacenamiento modular en el estadio olímpico de Berlín en el año 2003. En este proyecto, para un área de 40,000 m² se instaló un volumen de almacenamiento total de 2,500 m³ de agua, mediante la tecnología Aquacell (ver Figura 8-2 b). Los principales objetivos eran la reutilización (irrigación al campo de futbol y áreas verdes circundantes), infiltración y alivio del sistema de drenaje de la ciudad.

Ilchester Cheese Company – Somerset, Inglaterra

En Somerset, Inglaterra, Wavin Overseas desarrolló un sistema modular de almacenamiento/infiltración para una compañía de quesos (Ilchester Cheese Company). La idea era poder reducir el volumen de agua lluvia, dado que en esa localización siempre existían problemas asociados a inundaciones y excesos de escorrentía. Con el fin de lograr controlar el problema de las inundaciones en el sector y proveer almacenamiento temporal de la lluvia, se instalaron 1,352

[21] Wavin Overseas B.V., solutions for essentials. Disponible en línea en: www.wavinoverseas.com

[22] Pavco – Mexichem. Disponible en línea en: http://www.pavco.com.co/

[23] Atlantis Corp. Disponible en línea en: http://www.atlantis-america.com/

unidades de Aquacell para generar un volumen total de agua de 256 m³. Mediante esta implementación, el sector en el cual se encuentra la compañía Ilchester Cheese Company nunca volvió a sufrir problemas de inundación.

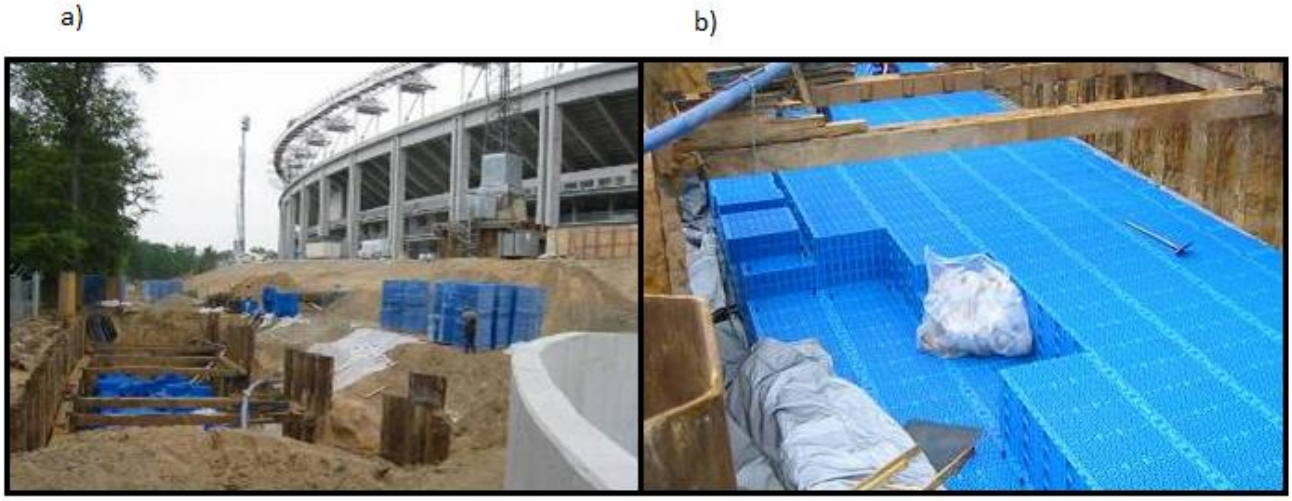


Figura 8-2. a) Sistema modular de almacenamiento/retención de agua lluvia - estadio de Frankfurt (Fuente: [86]), b) sistema modular de almacenamiento/retención de agua lluvia - estadio Olímpico de Berlín (Fuente: [86])

Complejo multifamiliar Byholm – Dinamarca

Este complejo multifamiliar está compuesto por 42 viviendas y un área total de 10,000 m² compuesto por oficinas, que contaba con un lago cercano, pero que no contaba con un sistema de drenaje pluvial y por esta razón siempre tenía problemas asociados a inundaciones y excesos de volúmenes de escorrentía. Era necesario idearse de alguna manera un sistema mediante el cual se descargara el agua lluvia proveniente de las superficies impermeables hacia el lago existente.

Como solución a dicho problema, se instaló un sistema modular sub superficial compuesto por 1500 unidades Aquacell en tres capas, para obtener una capacidad de almacenamiento de 300m³. Las unidades fueron recubiertas mediante una geomembrana impermeable para solo cumplir con la función de almacenamiento. El agua es retenida en esta estructura y es bombeada hacia el lago existente a una tasa de 5 litros por segundo. Correspondió a un proyecto ambientalmente muy amigable, pues empleó el cuerpo de agua existente para ayudar a mejorar las necesidades de drenaje de este complejo multifamiliar.

Proyectos desarrollados en Colombia

En Colombia, existe una compañía (Pavco – Mexichem) que ha venido estudiando e implementando los sistemas de almacenamiento modular de retención/infiltración. Por ejemplo, realizaron el diseño y construcción de esta tecnología en una de sus bodegas principales, el diseño y construcción de otro sistema para almacenamiento de agua en un edificio residencial en el municipio de Chía, Cundinamarca, y el diseño de otro sistema de retención/infiltración para una bodega en el municipio de Tocancipá, Cundinamarca. A continuación se profundizará en cada uno de dichos proyectos:

- Bodega Compañía Pavco Mexichem – Bogotá, Cundinamarca [87, 91]: Se llevó a cabo el diseño y construcción de un sistema de almacenamiento temporal mediante el uso de la tecnología Aquacell con el fin de disminuir el pico de caudal, evitando colapsos en el sistema de alcantarillado pluvial local, incluyendo la posibilidad de re-uso de las aguas lluvias recolectadas provenientes de la cubierta de una de las bodegas de la compañía. El volumen a almacenar correspondió a 74.9 m³, es decir que se requirieron de 405 celdas modulares las cuales se instalaron en 3 filas recubiertas con una geomembrana de 40 mm y geotextil no tejido 2500. Para el área de captación se empleó el sistema QuickStream desarrollado por Wavin, y después de cada bajante se ubicó su respectiva estructura de quiebre (cámara de inspección Novacam de 600 mm). Luego de las estructuras de quiebre se instaló una estructura de separación (cámara de inspección Novacam de 1000 mm), la cual se encargaba de separar el material particulado y contaminantes provenientes del área de captación. Luego se ubicaron las 405 celdas ensambladas, para finalmente ubicar un pozo eyector mediante el cual se pretendía drenar gradualmente el agua hacia el sistema de drenaje pluvial. A grandes rasgos, el presupuesto de obra correspondió a un valor cercano a los 75.000.000 COP. En la Figura 8-3 se puede apreciar el esquema general del diseño en perfil.

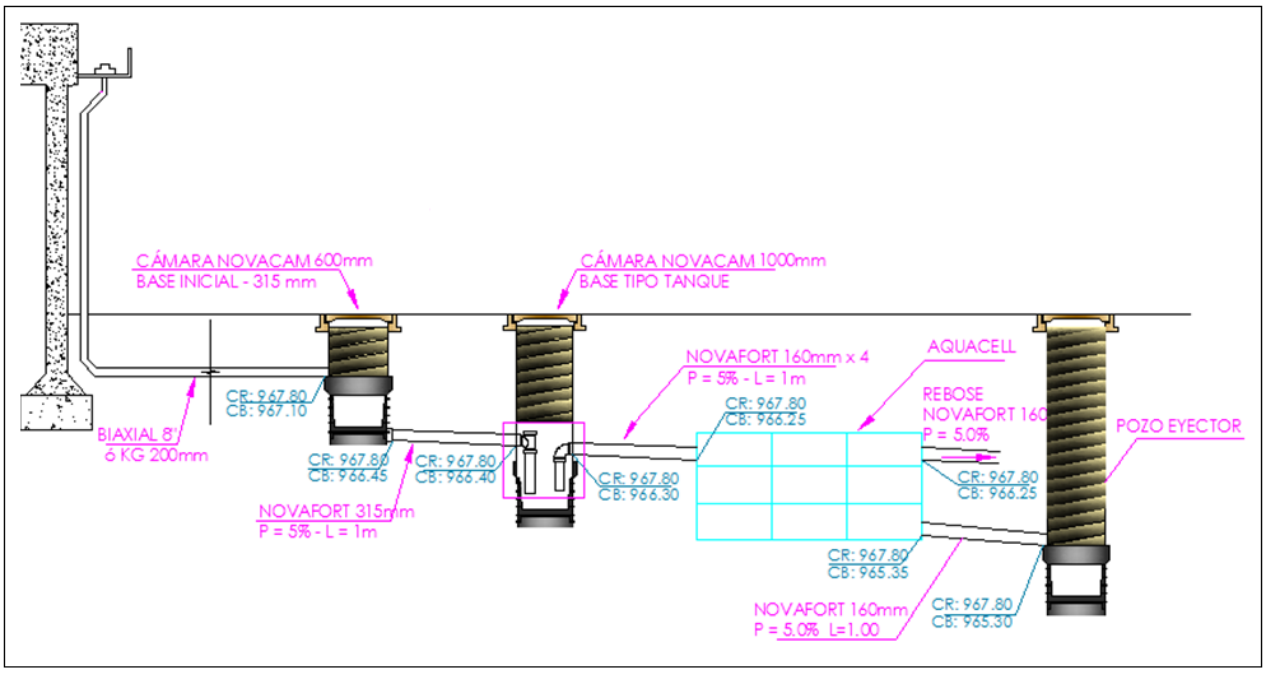


Figura 8-3. Esquema general de diseño en perfil sobre la implementación de un sistema modular de almacenamiento en una bodega de la compañía Pavco – Mexichem de Colombia (Fuente: [91]).

- Bodega Femsa - Tocancipá, Cundinamarca [87, 96]: De igual forma, se llevó a cabo el diseño de un sistema de almacenamiento temporal mediante el uso de la tecnología Aquacell con el fin de disminuir el pico de caudal y evitar desbordamientos del sistema de drenaje pluvial local, con opción de reutilización en riegos y sanitarios, de las aguas lluvias recolectadas de una bodega de la compañía Femsa. El área de captación correspondía a 68,500 m² y se diseñó empleando una intensidad de lluvia de 108 mm/hora. Al igual que el anterior, se diseñó el

sistema QuickStream para la recolección y transporte y se diseñaron cámaras Novacam de 600 y 1000 mm para las estructuras de quiebre y separación. El volumen total de almacenamiento correspondía a 3,465 m³, para un total de 18,750 celdas modulares. La idea era ubicar los sistemas modulares en bloques de tres celdas en cuatro niveles, en el perímetro de la bodega a una profundidad de 1.56 m. Se recubrirían en geomembrana de HDPE y geotextil NT 2500. La construcción no se llevó a cabo por parte de Pavco-Mexichem.

- Edificio Residencial Arboreda – Chía, Cundinamarca [87]: De igual forma, Pavco-Mexichem realizó el diseño y la implementación de un sistema modular de almacenamiento de agua lluvia en un edificio residencial (Arboreda) en el municipio de Chía, Cundinamarca. El objetivo del proyecto era exclusivamente el alivio del sistema de alcantarillado al reducir volúmenes de escorrentía y retrasar el pico de caudal. Por cuestiones de confidencialidad no se profundiza en el proyecto, pero en la Figura 8-4 se pueden apreciar dos fotografías acerca de su instalación y culminación.

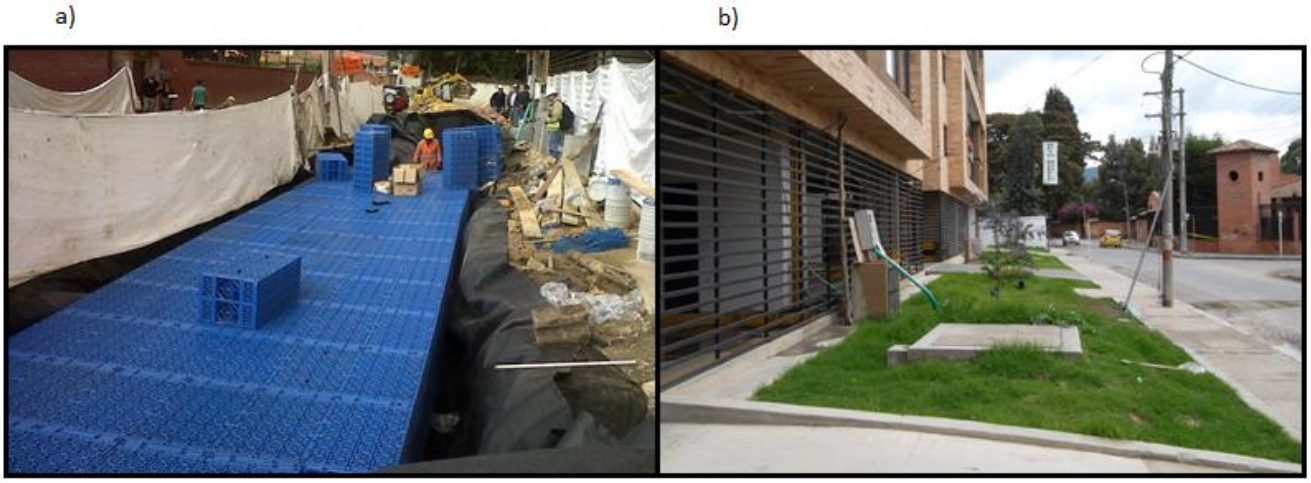


Figura 8-4. a) Instalación del sistema Aquacell en el edificio residencial Arboreda - Chía, Cundinamarca y b) proyecto culminado. (Fuente: [87])

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

Teniendo en cuenta el recorrido hecho a través de la problemática del drenaje urbano pluvial actual, y de los sistemas de almacenamiento/retención del agua lluvia a nivel predial, se puede concluir lo siguiente:

- En Colombia y en general en América Latina a partir del siglo XX, es claro que ha existido un déficit en cuanto al crecimiento e inversión de la infraestructura de drenaje con respecto al crecimiento de la población; la tasa de crecimiento demográfica se encuentra por encima de las tasas de crecimiento de la inversión y de la cobertura de este servicio.

- Cambios en el uso del suelo producto de la urbanización (impermeabilización), generan un profundo impacto en el ciclo hidrológico de las cuencas urbanas: mayores volúmenes de escorrentía, menor tiempo de concentración y reducciones en las tasas tanto de infiltración como de evapotranspiración.

- Fenómenos ambientales y producto de la actividad antropogénica como el cambio climático y las islas de calor, han aumentado el forzante radiativo incrementando el cambio en el equilibrio entre la radiación entrante a la atmósfera y la radiación saliente. Lo anterior ha provocado un incremento en las tasas de evaporación aumentando así la capacidad de la atmósfera para contener vapor de agua. Esto ha hecho que de una u otra forma se haya intensificado el ciclo hidrológico aumentando considerablemente la precipitación y nubosidad (sobre todo cerca de los grandes centros urbanos).

- El aumento de la precipitación global a causa del cambio climático y la urbanización, junto con el déficit de infraestructura de drenaje con respecto al crecimiento poblacional y económico, han hecho que las ciudades en expansión de los países en desarrollo experimenten mayores y más frecuentes inundaciones con relación a periodos pasados., siendo este desastre el más común en los últimos años.

- En el mundo ha surgido la necesidad de afrontar la gestión de las aguas pluviales desde una perspectiva diferente a la convencional, que combine aspectos hidrológicos, medioambientales y sociales. El empleo de prácticas de manejo en la fuente (SMPs por Source Management Practices) para el control de la lluvia, pretende reducir la escorrentía y los contaminantes de exceso que ingresan dentro de los sistemas de drenaje convencionales. La ventaja es que usualmente, este tipo de alternativas resultan mucho más eficientes en el manejo de la escorrentía, y mucho más costo-efectivas en cuanto a aspectos de construcción y mantenimiento que los sistemas convencionales de drenaje urbano.

- La implementación de los SMPs ha tenido un boom alrededor del mundo debido a las constantes y cada vez más seguidas sequías e inundaciones. Muchos gobiernos han establecido las regulaciones, estándares y guías para su instalación, operación y

mantenimiento, e inclusive han establecido toda clase de incentivos para que la población los adopte. En los países en vías de desarrollo, todavía no se encuentra bien regulado o la regulación que existe no es lo suficientemente clara para que se empiece a adoptar esta tecnología de forma masiva.

- A pesar de lo anterior, se han expuesto tres posibles riesgos que podrían presentar las medidas de control en la fuente (medidas descentralizadas) si se implementan masiva y separadamente de los sistemas convencionales de drenaje: 1) el conocimiento limitado acerca de sus posibles desventajas a largo plazo, 2) la tentación que representan estas tecnologías para ser usadas por las autoridades locales como forma económica de manejar el agua urbana, sin seguir invirtiendo en los sistemas convencionales que también son necesarios, y 3) las dificultades de mantenimiento y costos que resultarían al tener un sistema descentralizado (en la fuente) funcionando junto con un sistema centralizado (convencional).

- La retención/almacenamiento del agua lluvia corresponde a una de las tantas prácticas de manejo en la fuente (SMP). Es una tecnología ambiental y económicamente sostenible muy fácil de instalar y operar. Además cuenta con una gran cantidad de propósitos y beneficios dentro de los cuales se destacan: 1) reducción en volúmenes de escorrentía y picos de caudal, 2) capacidad de reutilización del agua (sanitarios, irrigación, lavado, etc.), 3) recarga de acuíferos mediante infiltración, 4) reducción de contaminantes y material particulado de la escorrentía, entre otros.

- El almacenamiento pasivo es mucho más efectivo en la reducción de volúmenes de escorrentía y picos de caudal a medida que la intensidad del evento de lluvia es menor. A medida que incrementa la intensidad y duración de la lluvia, la eficiencia de los barriles de almacenamiento se reduce significativamente. Un simple barril de agua lluvia (50 galones) instalado en cada predio de una cuenca urbana no genera impactos considerables en cuanto al volumen de agua lluvia atenuada (2-4%) al sistema de drenaje para eventos fuertes (lluvias con periodo de retorno de 50 años o más). Cuando se trata de un barril con mayor capacidad (100 galones), este valor puede llegar hasta el 14% para eventos menos fuertes (lluvias con periodo de retorno de 2 años o menos).

- A medida que incrementa la intensidad y duración de la lluvia, la eficiencia de los sistemas activos de almacenamiento se reduce, pero a una tasa mucho menor a la cual decrece la eficiencia de los barriles de agua lluvia. A pesar de que el almacenamiento activo solo alcanza reducciones entre el 10% y 17% del volumen de escorrentía aun para eventos muy intensos de lluvia, resulta una técnica mucho más efectiva que el almacenamiento pasivo, si ambos se aplican masivamente a una cuenca urbana de drenaje.

- Los sistemas modulares de almacenamiento activo tienen la mayor influencia en la reducción de volumen de escorrentía y picos de caudal, hasta del 100% para lluvias no tan intensas, y cerca de los 30-40% para lluvias con periodos de retorno muy altos si se aplican masivamente a una cuenca urbana de drenaje. Dichas reducciones dependen de muchos factores como el tamaño del almacenamiento, el área impermeable de la cuenca, el periodo seco antecedente, y la escala de implementación, etc. Al igual que los otros sistemas, a medida que incrementa la intensidad y duración de la lluvia, la eficiencia de los sistemas modulares de retención se reduce, pero a una tasa mucho menor a la cual decrece la eficiencia de los demás.

- El rendimiento de los sistemas de almacenamiento/retención de agua lluvia en cuanto a la reducción de contaminantes y sólidos suspendidos, es mayor a medida que el volumen de almacenamiento es mayor, o a medida que se tenga una mejor estructura de pre tratamiento. Igualmente, se obtienen mejores resultados en cuanto a calidad y cantidad de la escorrentía, cuando se operan junto con otras tecnologías LID como pavimentos permeables, jardines de lluvia, etc.

- Tanto el almacenamiento pasivo como activo, requieren de una operación y mantenimiento muy sencilla y en ambos casos puede ser realizado por el dueño del predio (a excepción de las estructuras de pre tratamiento en el activo). Los principales factores a tener en cuenta son el adecuado mantenimiento de las pantallas filtro (hojas, desechos y vectores), el sistema de recolecciín y transporte (canaletas y bajantes), el interior del elemento de almacenamiento (tanque o barril), los desviadores de primer lavado, y los elementos de entrada y salida al almacenamiento (mecanismo de desbordamiento).

- En los sistemas modulares de almacenamiento, la clave para obtener un buen desempeño es el adecuado mantenimiento de las estructuras de pre tratamiento. Independientemente del tipo de separador que se emplee (separador pequeño, separador hidrodinámico combinado o separador tipo “gully”), el mantenimiento a estas estructuras debe realizarse periódicamente (después de un evento de lluvia significativo) y mediante un agente externo al dueño del predio. Dicho agente puede ser una empresa certificada dedicada a la limpieza de elementos de los sistemas de acueducto y saneamiento básico, o la misma empresa prestadora del servicio. Generalmente se emplea un camión tipo Vactor o un equipo de succión móvil.

- En general, la experiencia en la implementación de los sistemas de retención/infiltración de agua lluvia a nivel predial se ha dado más que todo en países desarrollados (Estados Unidos y Europa). El desarrollo que estas tecnologías han tenido en Latinoamérica (especialmente Colombia), ha sido muy poca y prácticamente inexistente. Aun así, actualmente existen empresas como Pavco – Mexichem y Atlantis, las cuales han venido dando los primero pasos en cuanto al diseño e instalación de estos sistemas.

9.2. Recomendaciones

Este proyecto de investigación permitió conocer a fondo las tecnologías de almacenamiento/retención del agua lluvia a nivel predial mediante el almacenamiento activo, pasivo y modular. Sin embargo a continuación se presentan algunas recomendaciones que deberían ser tenidas en cuenta para continuar su estudio teórico:

- Es necesario realizar una búsqueda exhaustiva de experiencias y casos de aplicación adicionales a las mostradas en este documento en cuanto a la implementación de estos sistemas. Lo anterior, acompañado con algún trabajo de campo, permitiría comprender aún mejor como ha sido su desempeño en cuanto a aspectos de instalación, operación y mantenimiento.

- La implementación de sistemas de almacenamiento/retención de agua lluvia a nivel predial debe hacerse siguiendo una normatividad local y debe ajustarse a ciertas reglas y/o estándares impuestas por la sociedad. Por lo anterior, es recomendable profundizar en aspectos regulatorios y legislativos, es decir detallar en cuanto a las normas que regulan la instalación de este tipo de prácticas.

- Como se ha mencionado numerosas veces, los sistemas de almacenamiento/retención de agua lluvia a nivel predial se han venido implementando más que todo en países desarrollados (Estados Unidos y Europa). El desarrollo que estas tecnologías han tenido en Latinoamérica (especialmente Colombia), ha sido muy poca y prácticamente inexistente. Debido a esto, es fundamental establecer un estudio socioeconómico o análisis de pre factibilidad que permita establecer si la implementación de estas tecnologías es viable para el contexto latinoamericano, especialmente el colombiano.

- Es posible profundizar aún más en cuanto a la forma mediante la cual se han venido implementando estos sistemas en la sociedad y la forma como han sido aceptados por la misma. Es decir, establecer bien cuáles han sido las estrategias empleadas por administraciones locales, como por ejemplo incentivos económicos al reducir costos en la tarifa de la prestación del servicio de saneamiento básico y/o agua potable, entre otros.

10. REFERENCIAS

[1] *CEPAL y Naciones Unidas, «Urbanización en Perspectiva,» América Latina y el Caribe, Observatorio Demográfico, Santiago de Chile, 2009.*

[2] *CEPAL y Naciones Unidas, «Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe,» Publicación de las Naciones Unidas, Santiago de Chile, 2010.*

[3] *United Nations, «World Population Prospects: The 2008 Revision,» New York, 2009.*

[4] *A. E. Lattes, «Facultado latinoamericana de ciencias sociales: Sede Ecuador,» 2000. [En línea]. Available: http://www.flacso.org.ec/docs/sfcclates.pdf. [Último acceso: 23 Agosto 2013].*

[5] *C. Domínguez y E. Uribe, «Evolución del servicio de acueducto y alcantarillado durante la última década,» CEDE, Bogotá, 2005.*

[6] *I. Fainboim y C. Rodriguez, «El desarrollo de la infraestructura en Colombia en la década de los noventa Parte II,» Serie Reformas Económicas, 2000.*

[7] *E. M. Uribe, «Sector de acueducto y alcantarillado: avances y perspectivas,» Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá, 2010.*

[8] *J. M. Salinas, «Retos a futuro en el sector de acueducto y alcantarillado en Colombia,» Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, Santiago de Chile, 2011.*

[9] *J. M. Shepherd, «A Review of Current Investigations of Urban-Induced Rainfall and Recomendations for the Future,»* Earth Interactions, *vol. 9, nº 12, pp. 1-27, 2005.*

[10] *V. Srinivasan, K. Seto, R. Emerson y S. Gorelick, «The Impact of Urbanization on Water Vulnerability: A Coupled Human-Environment System Approach for Chennai, India,»* Global Environmental Change-Elsevier, *vol. 23, pp. 229-239, 2013.*

[11] *D. Butler y J. W. Davies, Urban Drainage, 3rd Edition ed., London: Spon Press, 2011.*

[12] *O. Barron, A. Barr y M. Donn, «Effect of Urbanisation on the Water Balance of a Catchment With Shallow Groundwater,»* Journal of Hidrology-Elsevier, *2012.*

[13] *D. Burns, T. Vitvar, J. McDonnell, J. Hassett, J. Duncan y C. Kendall, «Effects of suburban development on runoff generation in the Croton River basin, New York, USA,»* Journal of Hydrology - Elsevier, *vol. 311, pp. 266-281, 2005.*

[14] *M. Valtanen, N. Sillanpaa y H. Setala, «Effects of land use intensity on stormwater runoff and its temporal occurrence in cold climates,»* Hydrological Processes, *2013.*

[15] *D. Harisuseno, M. Bisri y A. Yudono, «Runoff modelling for simulating inundation in urban area as a result of spatial development change,»* Journal of Apllied Environmental and Biological Sciences, *vol. 2, nº I, pp. 22-27, 2012.*

[16] *X. Yang, L. Ren, V. Singh, X. Liu, F. Yuan y S. Jiang, «Impacts of land use and land cover changes on evapotranspiration and runoff at Shalamulun River watershed, China,»* Hydrology Research, *vol. 43, nº I-II, pp. 23-37, 2012.*

[17] *S. Motevalli, M. Hosseinzadeh, R. Esmaili, K. Derafshi y S. Gharehchahi, «Assesing the effects of land use change on hydrological balance of Kan watershed using SCS and HEC-HMS hydrological models, Tehran, Iran,»* Australian Journal of Basic and Applied Sciences, *vol. 6, nº 8, pp. 510-519, 2012.*

[18] *C. Dow y D. DeWalle, «Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in*

eastern United States,» Water Resources Research, *vol. 36, nº 7, pp. 1835-1843, 2000.*

[19] *I. A. Camilloni, «Clima y cambio climático,» de* Dinámica de una ciudad. Buenos Aires, 1810-2010, *T. Cillo, Ed., Buenos Aires, Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, 2010, pp. 61-91.*

[20] *V. Barros y I. Camilloni, «Urban-baised trend in Buenos Aires' mean temperature,»* Climate Research, *vol. 4, pp. 33-45, 1994.*

[21] *J. M. Shepherd, H. Pierce y A. Negri, «Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite,»* Journal of Applied Meteorology, *vol. 41, pp. 689-701, 2002.*

[22] *H. Takahashi, «Secular variation in the occurrence property of summertime daily rainfall amount in and around the Tokio metropolitan area,»* Tenki, *vol. 50, nº 1, pp. 31-41, 2003.*

[23] *F. Fujibe, «Long-term Surface Wind Changes in the Tokyo Metropolitan Area in the Afternoon of Sunny Days in the Warm Season,»* Journal of The Meteorological Society of Japan, *vol. 81, nº 1, pp. 141-149, 2003.*

[24] *M. Rodriguez y H. Mance, Cambio climático: lo que está en juego, Bogotá: Foro Nacional Ambiental - Dupligráficas, 2009.*

[25] *I. Camilloni, «Cambio Climático - Escuela de Verano Universidad de los Andes,» Bogotá, 2013.*

[26] *D. Butler, B. McEntee, C. Onof y A. Hagger, «Sewer storage tank performance under climate change.,»* Water Science and Technology, *vol. 56, nº 12, pp. 29-35, 2007.*

[27] *A. Semadeni-Davies, C. Hernebring, G. Svensson y L. Gustafsson, «The Impacts of Climate Change and Urbanization on Drainage in Helsingborg, Sweden: Combined Sewer System,»* Journal of Hidrology-Elsevier, *vol. 350, pp. 100-113, 2008.*

[28] *J. C. Bertoni, «La problemática de las inundaciones urbanas - El caso de la cuenca Matanza-Riachuelo,» Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, Córdoba.*

[29] *A. K. Jha, R. Bloch y J. Lamond, Ciudades e Inundaciones, Guía para la Gestión Integrada del Riesgo, Washington DC: The World Bank, 2012.*

[30] *J. C. Bertoni, S. Ambrosino, O. Barbeito, A. Daniele, J. A. Maza, C. U. Paoli y J. J. Serra, Inundaciones Urbanas en Argentina, Primera Edicion ed., Córdoba, 2004.*

[31] *C. E. Tucci, Gestión de inundaciones urbanas, Porto Alegre, Brasil: OMN, 2006.*

[32] *R. Domínguez, «Las Inundaciones en la Ciudad de México. Problemática y Alternativas de Solución,»* Revista Digital Universitaria, *vol. 1, nº 2, 2000.*

[33] *J. Hernández y A. Vieyra, «Riesgo por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana. ¿El desastre nace o se hace?,»* Revista de Geografía Norte Grande, *vol. 47, pp. 45-62, 2010.*

[34] *M. Perevochtchikova y J. L. Lezama, «Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México,»* Journal of Latin American Geography, *vol. 9, nº 2, pp. 73-98, 2010.*

[35] *R. K. Sedano, Y. Carvajal, F. Vallés y I. Andrés, «Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia,» Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente - Universitad Politécnica de Valencia, Valencia (España), 2012.*

[36] *F. L. Franco, «Respuestas y propuestas ante el riesgo de inundación de las ciudades colombianas,»* Revista de ingeniería. Universidad de los Andes, Bogotá, *vol. 31, pp. 97-108, 2010.*

[37] *Noticreto, «Barranquilla finalmente está dando solución a los arroyos,»* Noticreto, la revista

de la técnica y la construcción, *vol. 116, pp. 68-71, 2013.*

[38] *Proyecto Arroyos de Barranquilla, «Arroyos de Barranquilla,» 2013. [En línea]. Available: http://www.arroyosdebarranquilla.co/. [Último acceso: 29 Septiembre 2013].*

[39] *H. Ávila, «Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia,»* Revista de Ingeniería-Universidad de los Andes, *nº 36, pp. 54-59, 2012.*

[40] *H. Ávila y K. S. Díaz, «Reducción del volumen de escorrentía en cuencas urbanas consolidadas de alto porcentaje impermeable con tecnologías LID,» XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica, 2012.*

[41] *S. Perales Momparler y I. Andrés-Doménech, «Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua lluvia,»* Equipamiento y Servicio Municipales, *vol. 24, nº 133, pp. 66-77, 2007.*

[42] *F. Alferink y Wavin Overseas, «Precious water: To be managed in order to obtain a condition of sustainabity,» Water conference Aruba, Aruba, 2007.*

[43] *A. Barbosa, J. Fernandes y L. David, «Key issues for sustainable urban stormwater management,»* Water Research, *vol. 46, pp. 6787-6798, 2012.*

[44] *F. Alferink y Wavin Overseas, «Urban water management: Principles, design and application,» Aprocof, Bogotá, 2012.*

[45] *G. Freni, G. Mannina y G. Viviani, «Urban Storm-Water Quality Management: Centralized versus Source Control,»* Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE), *vol. 136, nº 2, pp. 268-278, 2010.*

[46] *L. L. Andrews, M. Barrett, R. Bridget, P. Martin, C. Jefferies y M. Hollon, «Performance and whole life costs of BMPs and SUDs,» IWA Publishing, London, 2005.*

[47] *United States Environmental Protection Agency (EPA), «Low Impact Development (LID) a literature review,» Low Impact Development Center, Washington D.C., 2000.*

[48] *Prince George's County, Low-Impact Development Design Strategies, an integrated desig approach, Largo, Maryland: Department of Environmental Resources, 1999, pp. 4.1 - 4.25.*

[49] *N. Marleni, S. Gray, A. Sharma, S. Burn y N. Muttil, «Impact of water source management practices in residentiai areas on sewer networks - A Review,»* Water Science & Technology, *vol. 65, nº 4, pp. 624-642, 2012.*

[50] *M. S. Cheng, L. S. Coffman, Y. Zhang y Z. J. Licsko, «Hydrological Responses from Low Impact Development comparing with Conventional Development,»* Protection and Restoration of Urban and Rural Streams, *vol. 18, pp. 419-430, 2004.*

[51] *A. Guillette, «Whole Building Design Guide (WBDG),» 18 10 2010. [En línea]. Available: http://www.wbdg.org/resources/lidtech.php. [Último acceso: 17 Diciembre 2013].*

[52] *UNEP, Rainwater Harvesting And Utilisation - An Environmentally Sound Approach for Sustainable Urban Water Management: An Introductory Guide for Decision-Makers, Volume 2 ed., UNEP International Environmental Technology Centre: United Nations Environment Programme, 2002.*

[53] *Texas Water Development Board, «The Texas Manual on Rainwater Harvesting,» Third Edition, Austin, Texas, 2005.*

[54] *The Caribbean Environmental Health Institute, «Rainwater, Catch it While You Can: A Handbook on Rainwater Harvesting in the Caribbean,» UNEP (The United Nations*

Environment Programme), Nairobi, 2009.

[55] *California Environmental Protection Agency, «Low Impact Development Designs and Practices for Urban Storm Drainage Management,» Central Coast Regional Water Quality Control Board, City of Salinas, 2007.*

[56] *Virginia Department of Conservation and Recreation, «Virginia DCR Stormwater Design Especification No 6,» Version 1.9.5, Virginia, 2011.*

[57] *EPA, «Rainwater Harvesting: Conservation, Credit, Codes and Cost. Literature Review and Case Studies,» U.S. Environmental Protection Agency EPA, Washington DC, 2013.*

[58] *J. A. Forasté y D. Hirschman, «A Methodology for using Rainwater Harvesting as a Stormwater Management BMP,» Charlottesville, VA.*

[59] *NJ Departament of Environmental Protection, «NJ Stormwater Best Management Practices Manual,» State of New Jersey, New Jersey, 2004.*

[60] *Iowa Departament of Natural Resources, «Iowa Stormwater Management Manual,» State of Iowa, Iowa, 2010.*

[61] *U.S. Departament of Agriculture Soil Conservation Service, «A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds,» 1973.*

[62] *South Pacific Applied Geoscience Commission (SOPAC) and Tonga Community Development Trust (TCDT), «Harvesting the Heavens, Guidelines for Rainwater Harvesting,» The Swedish International Development Agency (SIDA), Suva, Fiji Islands, 2004.*

[63] *B. Dolman y K. Lundquist, «Roof Water Harvesting for a Low Impact Water Suppl. Featuring the Brazilian Ball Pre-Filter System: A Case Study,» Water Institute: Watershed Advocacy, Training, Education and Research, 2007.*

[64] *L. W. Mays, Stormwater collection systems design handbook, McGraw-Hill, 2001.*

[65] *R. H. French, «Cisterns for water conservation and flood control,»* Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE), *vol. 114, pp. 565-577, 1988.*

[66] *C.-H. Liaw y Y.-L. Tsai, «Optimum storage volume of rooftop rainwater harvesting systems for domestic use,»* Journal of the American Water Resources Association, *vol. 40, nº 4, pp. 901-912, 2004.*

[67] *A. Campisano y C. Modica, «Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily,»* Resources, Conservation and Recycling, *vol. 63, pp. 9-16, 2012.*

[68] *A. Campisano y C. Modica, «Regional scale analysis for the design of storage tanks for domestic rainwater harvesting systems,»* Water Science & Technology, *vol. 66, nº 1, pp. 1-8, 2012.*

[69] *K. Sands y T. Chapman, «Rain Barrels, Truth or Consequences,»* EPA, National Conference on Urban Storm Water: Enhancing Programs at the Local Level, *vol. I, pp. 390-394, 2003.*

[70] *Philadelphia Water Department, «Stormwater Management Guidance Manual,» Office of Watersheds, City of Philadelphia, 2011.*

[71] *Water Conservation Program, «City of San Diego - Rainwater Harvesting Guide,» City of San Diego, State of California, 2012.*

[72] *Sustainable Sanitation and Water Management, «Illustration of water flow scheme of a RTRWH system,» [En línea]. Available: http://www.sswm.info/category/implementation-tools/water-sources/hardware/precipitation-harvesting/rainwater-harvesting-r. [Último acceso: 4 Diciembre 2013].*

[73] *American Rivers, «Catching the Rain: A Great Lakes Resource Guide for Natural Stormwater Management,» Maplewood, Minnesota, 2004.*

[74] *G. Petrucci, J.-F. Deroubaix, B. de Gouvello, J.-C. Deutsch, P. Bompard y B. Tassin, «Rainwater harvesting to control stormwater runoff in suburban areas. An experimental case-study,»* Urban Water Journal, *vol. 9, nº 1, pp. 45-55, 2012.*

[75] *L. M. Ahiablame, B. A. Engel y I. Chaubey, «Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement,»* Journal of Environmental Management, *vol. 119, pp. 151-161, 2013.*

[76] *J. Steffen, M. Jensen, C. A. Pomeroy y S. J. Burian, «Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in U.S. cities,»* Journal of the American Water Resources Association, *vol. 49, nº 4, pp. 810-824, 2013.*

[77] *C. Damodaram, M. H. Giacomoni, C. P. Khedun, H. Holmes, A. Ryan, W. Saour y E. M. Zechman, «Simulation of Combined Best Management Practices and Low Impact Development for Sustainable Stormwater Management,»* Journal of the American Water Resources Association, *vol. 46, nº 5, pp. 907-918, 2010.*

[78] *G. Vaes y J. Berlamont, «The effect of rainwater storage tanks on design storms,»* Urban Water, *vol. 3, pp. 303-307, 2001.*

[79] *P. S. Calabro y G. Viviani, «Simulation of the operation of detention tanks,»* Water Research, *vol. 40, pp. 83-90, 2006.*

[80] *A. Khastagir, L. Jayasuriya y L. N. N. Jayasuriya, «Impacts of using rainwater tanks on stormwater harvesting and runoff quality,»* Water Science & Technology, *vol. 62, nº 2, pp. 324-329, 2010.*

[81] *E. Sazakli, A. Alexopoulus y M. Leotsinidis, «Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece,»* Water Research, *vol. 41, pp. 2039-2047, 2007.*

[82] *C. Despins, K. Farahbakhsh y C. Leidl, «Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada,»* Journal of Water Supply: Research and Technology, *vol. 58, nº 2, pp. 117-134, 2009.*

[83] *S. Ward, F. Memon y D. Butler, «Harvested rainwater quality: the importance of appropriate design,»* Water Science & Technology, *vol. 61, nº 7, pp. 1707-1714, 2010.*

[84] *Wavin Plastics Limited, «Intensio, Intelligent Stormwater Solutions. Infiltration and Atenuation Systems: Product and Installation Guide,» Chippenham, 2009.*

[85] *Wavin Plastics Limited, «AquaCell and Garastor Stormwater Management Systems: Effective, Modern Solutions for Housing and Local Infrastructure,» Chippenham, UK, 2009.*

[86] *Pavco - Mexichem, «Manejo de Aguas Lluvias,» Bogotá, 2010.*

[87] *F. Alferink y I. E. Wills, Interviewees,* Entrevista con Frans Alferink (Wavin Product Manager Civils & Infrastructure) e Inés Elvira Wills (Pavco Gerente Técnica). *[Entrevista]. 6 Noviembre 2013.*

[88] *Wavin, «Wavin Save Road Gullies Product Brochure,» Rainwater Drainage from Streets and Roads, 2012.*

[89] *Pavco - Mexichem, «Cámaras y Cajas de Inspección Novacam,» Bogotá, 2012.*

[90] *F. Alferink y Wavin Overseas, «Water management around buildings having large roofs and other impermeable surfaces.,» Aprocof, Bogotá, 2010.*

[91] *G. Quintana y Pavco, «Diseño del sistema de almacenamiento temporal de aguas lluvias,*

bodega GRP,» Bogotá, 2012.

[92] *EPA & Christopher Kloss Low Impact Development Center, «Managing Wet Weather with Green Infrastructure Municipal Handbook,» Philadelphia, 2008.*

[93] *Environmental Services City of Portland, «Chapter 3. Operation and Maintenance,» de* Stormwater Management Manual, *Portland, Oregon, 2004, pp. 3.1-3.28.*

[94] *D. Stuart, «On-Site Runoff Mitigation with Rooftop Rainwater Collection and Use,» King County Departament of Natural Resources, King County, Washington, 2001.*

[95] *Cabell Brand Center, «Virginia Rainwater Harvesting Manual,» Second Edition , Salem, VA, 2009.*

[96] *Pavco - Mexichem, «Manejo sostenible de aguas lluvias bodega FEMSA,» Tocancipá, Cundinamarca, 2012.*

[97] *R. Hamdi, P. Termonia y P. Baguis, «Effects of Urbanization and Climate Change on Surface Runoff of the Brussels Capital Region: a case of study using an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model,»* International Journal of Climatology, *vol. 31, pp. 1959-1974, 2011.*

[98] *T. Oke, «The energetic basis of the urban heat island,»* Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, *vol. 108, nº 455, pp. 1-24, 1982.*

[99] *C.-Y. Lin, W.-C. Chen, P.-L. Chang y Y.-F. Sheng, «Impact of the urban heat island effect on precipitation over a complex geographic environmentin northern Taiwan,»* American Meteorological Society, *vol. 50, pp. 339-353, 2011.*

[100] *S. Ward, F. Memon y D. Butler, «Performance of a large building rainwater harvesting system,»* Water Research (Elsevier), *vol. 46, pp. 5127-5134, 2012.*

[101] *A. Palla, I. Gnecco, L. Lanza y P. La Barbera, «Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones,»* Resources, Conservation and Recycling, *vol. 62, pp. 71-80, 2012.*

[102] *F. A. Abdulla y A. Al-Shareef, «Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan,»* Desalination, *vol. 243, pp. 195-207, 2009.*

[103] *H. Ávila y K. Díaz, «Investigación sobre gestión de cuencas para control de crecientes mediante tecnologías sostenibles de drenaje en zonas urbanas consolidadas,» Barranquilla, 2011.*