

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS DE
DRENAJE SOSTENIBLE
EN EDIFICACIONES EXISTENTES DEL ÁREA
METROPOLITANA DE SAN SALVADOR**

PRESENTADO POR:

NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

WILBER JONATHAN SANTOS FLORES

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR INTERINO :

ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título:

**PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS DE
DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN
SALVADOR**

Presentado por:

NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

WILBER JONATHAN SANTOS FLORES

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS

ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ALFARO LÓPEZ

(ASESORA EXTERNA)

San Salvador, junio de 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS

ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ALFARO LÓPEZ

(Asesora Externa)

AGRADECIMIENTOS:

A toda mi familia: Gracias por el acompañamiento, apoyo y guía en todo este proceso, por ser pilar fundamental y motor para lograr todas mis metas, por alentarme a seguir adelante en mi desarrollo personal y profesional. Gracias por proveerme de todo lo necesario y convertirme en un privilegiado en esta vida.

A la Universidad de El Salvador: Por formarme de la mejor manera en el campo de la Ingeniería y darme todas las herramientas necesarias para insertarme en el mundo profesional y laboral.

A mi compañero de Tesis, Jonathan Santos: Gracias por el esfuerzo y dedicación puestos durante todo el proceso del Trabajo de Graduación, por su tiempo y apoyo incluso en momentos de gran carga laboral.

A mis compañeros y amigos: A Mónica, Oscar, Pablo, Michelle, Evelio, Jonathan, Merino, Isassi, Guillermo, y a todos y todas la que formaron parte de este proceso lleno de experiencias y aprendizajes, con quienes crecimos como personas y como profesionales.

Y a todas las personas que han estado cerca, apoyándome y siendo parte. Gracias por el cariño y el crecimiento compartido.

Noel Hidalgo Rodríguez Nieto

AGRADECIMIENTOS:

A mi familia: Gracias por el apoyo que recibí de ustedes lo largo de mi formación superior, en especial a mi abuela quien fue de las personas que más se preocupó por mí, y me brindo apoyo día con día.

A nuestros Asesores: Ing. Edwin Escobar e Ing. MSc. Ingrid Alfaro, quienes nos han acompañado en la realización de este trabajo de graduación, guiándonos con sus conocimientos, brindándonos su apoyo y paciencia en cada etapa.

A nuestros Docentes: Gracias a cada uno de ustedes, quienes procuraron entregar la mejor formación posible transmitiendo sus conocimientos, y experiencias, hoy vemos los frutos positivos de tanto sufrimiento en sus clases.

A mi compañero de Tesis, Noel Rodríguez: Gracias por el esfuerzo y dedicación puestos durante todo el proceso del Trabajo de Graduación, por su tiempo y apoyo incluso en momentos de gran carga laboral.

A mis compañeros y amigos: Gracias inmensas, a todos aquellos que en momentos difíciles nunca nos dejamos de apoyar, todos aquellos que alguna vez nos desvelamos estudiando para salvar una materia. Sé que al leer esto sabrán a quienes está dirigido este agradecimiento.

Wilber Jonathan Santos Flores

DEDICATORIA:

A Dios y a La Vida, que nos han dado y nos sigue dando tanto.

A mi madre, Berta Lidia Nieto, y mi padre, Noel Tovar: quienes me han dado guía, soporte, refugio y calidez, y me han inculcado el amor y el buen vivir, la humildad y el orgullo de andar por el buen camino. De quienes quiero reflejar todo lo bueno que me han enseñado y superar sus expectativas.

A mis hermanos, Cristabel Rodríguez y Melvin Rodríguez: Por ser parte de este largo camino, porque queriendo o sin querer, hicieron y siguen haciendo de los momentos desafiantes y difíciles algo más liviano, y de quienes igualmente he aprendido cosas valiosas.

A mis abuelas que están y a mis abuelos que ya no están: quienes han sido fuente de tanta sabiduría y aprendizaje que no se puede encontrar más que ellos.

A mi tía Berlany Nieto: que fue la madre que nunca elegí, pero siempre valoré, a quien recuerdo con todo el amor que me inculcó y con la sonrisa que siempre tuvo.

Noel Hidalgo Rodríguez Nieto

DEDICATORIA:

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres, hermanos, tío y abuela, que me apoyaron y contuvieron los momentos malos y en los menos malos. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades sin perder nunca la cabeza, ni morir en el intento.

A mi madre especialmente quien me ha enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

También quiero dedicarle este trabajo a mi novia y futura esposa. Gracias por tu paciencia, apoyo y por tu comprensión, por tu empeño, por tu fuerza, por tu amor, que me has dado desde el primer día. Realmente, me ayudas a alcanzar el equilibrio que me permite dar todo mi potencial. Nunca dejaré de estar agradecido por esto.

Wilber Jonathan Santos Flores

ÍNDICE

CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Planteamiento del problema.....	6
1.4 Objetivos.....	8
1.5 Alcances.....	9
1.6 Limitaciones.....	10
1.7 Justificación.....	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Inundaciones urbanas.....	17
2.2.1. Causas de las inundaciones.....	17
2.2.2. Clasificación de las inundaciones.....	25
2.2.3. Problemática de la urbanización y las inundaciones.....	29
2.2.4. Impactos sociales y económicos de las inundaciones.....	34
2.2.5. Impactos del cambio climático en El Salvador.....	38
2.2.6. Inundaciones en el AMSS.....	43
2.3 Sistemas de drenaje pluvial convencionales.....	47
2.3.1. Historia de la Red de drenaje pluvial del AMSS.....	47
2.3.2. Componentes de la Red de alcantarillado pluvial.....	50
2.3.3. Condición de la Red de alcantarillado pluvial del AMSS.....	56
2.3.4. Normativas y Leyes para drenajes convencionales en El Salvador.....	60
2.4 Sostenibilidad.....	67
2.4.1. Informe Brundtland: “Nuestro objetivo común”.....	67
2.4.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible del Milenio (ODS).....	69
2.4.3. Ciudades y comunidades sostenibles.....	71
2.4.4. Desafíos para la sostenibilidad del drenaje en el siglo XXI.....	71
2.5 Generalidades de los SUDS.....	74
2.5.1. Drenaje Sustentable.....	74

2.5.2. Experiencias internacionales y maneras de ver el Drenaje Sustentable	76
2.5.3. El Paradigma de la Sustentabilidad.....	79
2.5.4. Objetivos del Drenaje Sustentable.	80
2.5.5. Principios del Drenaje Sustentable.....	80
2.5.6. Funcionamiento de los SUDS.....	82
2.5.7. Efectos de los SUDS en las ciudades	83
Problemas que los SUDS pueden ayudar a controlar en el AMSS	86
Soluciones que aportan los SUDS.	86
2.5.8. Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible.	89
2.5.9. Componentes estructurales de los Sistemas de Drenaje Sostenible	90
2.5.10. El Tren o Cadena de Drenaje.....	91
2.5.11. Similitudes y diferencias entre el drenaje convencional y los SUDS. 93	
2.5.12. Guías técnicas para la implementación de los SUDS.	96
2.6 Proceso de diseño de SUDS en el AMSS.	97
2.6.1 Fases del Diseño y Objetivos de Diseño de los SUDS.....	97
2.6.2 Fase 1: Caracterización de la zona de proyecto.....	103
2.6.3 Fase 2: Creación de un modelo conceptual (La Cadena de Drenaje. 114	
2.6.4 Fase 3: El proyecto SUDS.....	130
2.6.5 Informe final de diseño.	140
2.6.6 Principios básicos de diseño.	142
2.6.7 Características básicas de los SUDS.	145
2.6.8 Depósitos de lluvia.	151
2.6.9 Techos verdes.....	155
2.6.10 Pozos de infiltración.	163
2.6.11 Zanjas de infiltración.	168
2.6.12 Superficies permeables.....	173
2.6.13 Lagunas de infiltración.	181
2.6.14 Cunetas verdes.	188

2.6.15	Áreas de Bioretención.....	197
2.6.16	Franjas filtrantes.....	208
2.6.17	Depósitos subterráneos de detención.....	216
2.6.18	Estanques de laminación.....	224
2.6.19	Medidas no estructurales.....	234
2.7	Los SUDS en la valoración económica.....	236
CAPÍTULO III: IDENTIFICACION DE LOS SECTORES DE ESTUDIO Y DIAGNOSTICO.....		
3.1	Introducción.....	232
3.2	Identificación de Sectores de Estudio.....	233
3.2.1	Criterios para la evaluación de los sectores identificados.....	247
3.2.2	Selección de los Sectores de Estudio.....	251
3.3	Diagnóstico de la Red de Drenaje Pluvial de los Sectores de Estudio. 257	
3.3.1	Análisis Hidrológico.....	258
3.3.2	Análisis Hidráulico.....	266
3.4	Resumen de Resultados Obtenidos en el Diagnostico de los Sectores de Estudio Prioritarios.....	275
3.4.1	Sector Boulevard de los Próceres. (Cuenca S164).....	276
3.4.2	Sector Boulevard Orden de Malta. (Cuenca S194).....	283
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE SITIOS DE INUNDACIÓN EN EL AMSS.....		
4.1	Introducción.....	285
4.2	Propuesta de Técnicas SUDS a Aplicar en los Sectores de Estudio.....	286
4.2.1	Establecimiento de la Cadena de Drenaje.....	286
4.2.2	Diseño de Técnicas SUDS a aplicar.....	287
4.3	Matriz de Resultados con enfoque en la Reducción de Inundación.....	292
4.4	Comparativa de volúmenes controlados respecto de volúmenes iniciales.....	259
4.5	Análisis de Costos de SUDS Propuestos.....	261
4.5.1	Costos Directos de Técnicas SUDS propuestas.....	262

4.6	Matriz de Triple Enfoque Económico, Ambiental (Hidráulico), y Social.	267
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		269
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	269
5.2.	CONCLUSIONES.....	270
BIBLIOGRAFIA		280
ANEXOS		283

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, SUDS (por sus siglas en español), son un conjunto de nuevas estrategias que se utilizan para solventar problemas relacionados con el drenaje y la gestión de aguas pluviales, para mejorar así el desarrollo y la sostenibilidad en las ciudades. Estos cuentan con un enfoque que aborda la problemática partiendo del ciclo natural del agua y el aprovechamiento integral del recurso.

La importancia de este proceso de diseño de nuevas alternativas de drenaje, y comparación con el drenaje convencional, recae en fomentar y dar una base teórica que ayuda a comprender los beneficios sociales, económicos y ambientales que conlleva la implementación de estas técnicas. Lo cual, en el corto y mediano plazo, sirva como alivio a la problemática de drenajes que se vive año con año en el AMSS.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 Introducción.

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), son un conjunto de nuevas estrategias que se utilizan para solventar problemas relacionados con el drenaje y la gestión de aguas pluviales, para mejorar así el desarrollo y la sostenibilidad en las ciudades. Estos cuentan con un enfoque global, que aborda esta problemática partiendo del ciclo natural del agua y el aprovechamiento integral del recurso. Todo ello contribuirá, a largo plazo, a crear espacios urbanos más sostenibles y por lo tanto, mejor adaptados al entorno y a las necesidades de las comunidades que habitan en ellos.

El Salvador cuenta con un clima tropical, lo que genera presencia de precipitaciones casi continuas y muy abundantes durante gran parte del último semestre del año.

Por otra parte; en las últimas décadas y por muchos factores, la expansión urbana de las ciudades y pueblos se ha visto acelerada y poco planificada, lo que ha ocasionado que el fenómeno de las inundaciones urbanas, sean habituales en la mayoría de las ciudades del País; lo anterior, sumado a la finalización de la vida útil de los sistemas de drenaje existentes, convierte al Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), en una de las zonas que más afectaciones ha tenido.

Debido a la importancia económica, social y ambiental del AMSS, se busca, como objetivo principal, desarrollar una propuesta de aplicación de los *SUDS*, en zonas

que cuentan con edificaciones existentes, que en su mayoría son lotes privados con una red de drenaje convencional, en las que se deberá identificar los puntos con mayor afectación por el fenómeno antes referido y posteriormente realizar análisis hidrológicos e hidráulicos, con el fin de determinar parámetros de diseño de elementos necesarios, para modificar las condiciones actuales de cada sitio afectado, haciendo una comparación de las situaciones existentes, con la situación que ocurriría al aplicar esta propuesta y determinando así, los beneficios hidráulicos que se tendrían, agregando sus respectivos presupuestos de las obras necesarias; además, de presentar los beneficios sociales y ambientales generados de su posible aplicación.

Todo esto, partiendo de la base técnica que permita plantear de manera correcta la mejor opción para determinados puntos de estudio, tomando en cuenta las condiciones de los sitios determinados y aplicando la normativa existente y las recomendaciones de las autoridades correspondientes.

La importancia de este proceso de diseño de nuevas alternativas de drenaje, y comparación con el drenaje convencional, recae en fomentar y dar una base teórica que ayuda a comprender los beneficios sociales, económicos y ambientales que conlleva la implementación de estas técnicas SUDS; lo cual, en el corto y mediano plazo, sirva como alivio a la problemática de drenajes que se vive año con año en el AMSS.

1.2 Antecedentes.

Desde que la humanidad construyó las primeras ciudades, ha tenido que lidiar con diversos problemas relacionados con la gestión del agua para satisfacer las necesidades de sus pobladores y a medida que estas crecían; uno de los principales problemas fue es el manejo de las aguas pluviales, que a lo largo de la historia ha hecho que los ingenieros desarrollen sistemas de drenajes que las controlen y las dispongan.

Los primeros proyectos de drenaje urbano estaban centrados únicamente en la cantidad de agua de escorrentía a evacuar, sin tener en cuenta la calidad y cantidad del agua vertida al medio, esto es, que los sistemas de drenaje estaban diseñados con el mero objetivo de evitar inundaciones, sin considerar el potencial daño ambiental intrínseco del vertido de un agua de escorrentía, que arrastra una cantidad considerable de carga contaminante, al medio ambiente. Parte de la solución a la impermeabilización de los suelos y al drenaje deficiente puede encontrarse al desarrollar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (*SUDS*) que permitan el máximo aprovechamiento del agua en su gestión. Por lo anterior, los inconvenientes que genera al día de hoy el drenaje en las zonas urbanas, cada vez más extensas, hacen necesario el abordaje de nuevas técnicas e infraestructuras que permitan equilibrar tantos aspectos cuantitativos, cualitativos y de servicio.

En el Informe Brundtland (1987), presentado en la cumbre de Río de Janeiro (Brasil en 1992), a partir del trabajo realizado por la Comisión Mundial de Medioambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, empieza a plantearse un nuevo enfoque para el diseño del drenaje urbano en general.

El desarrollo sostenible, abordado en esta cumbre por primera vez de forma institucional, se fundamenta en considerar para el desarrollo urbano que los aspectos económicos, sociales y medioambientales, coexistan estratégicamente en conjunto y simultáneamente, generando sostenibilidad, como tres pilares fundamentales. Fruto de este pensamiento nace el concepto del triángulo de la sostenibilidad, que en este tema, consiste en plantear un diseño de desarrollo de drenaje urbano que tiene tres focos principales que sirven de indicadores: los aspectos relacionados con la cantidad del agua, su calidad y con el servicio que se ofrece a la sociedad. Estos tres factores y la consecución de su equilibrio son los aspectos más relevantes para diseñar *SUDS*.

Los *SUDS* han sido implementados con distintas denominaciones en diferentes países desde las décadas de los 80s y 90s. Todos ellos son complemento y alternativa al tratamiento tradicional de las aguas, siendo una solución en sí mismos y una ayuda complementaria para los sistemas ya existentes.

En El Salvador, el desarrollo urbanístico en el Área Metropolitana de San Salvador (*AMSS*) ha supuesto un reto en cuanto a la orientación de las aguas

lluvias y escorrentía que genera la impermeabilización de los suelos, debido principalmente a las construcciones existentes y futuras.

Hasta mediados del siglo pasado, los trámites que involucran a la factibilidad de las aguas lluvias eran gestionados por la extinta Dirección General de Urbanismo y Arquitectura (*DUA*); sin embargo, con su desaparición, el trámite es desde 1999 obtenido para el AMSS, por la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (*OPAMSS*), encontrándose ésta, en un principio, con una red de drenaje de más de 50 años de existencia y con una mancha urbana expandida y muy desarrollada, llegando a ser, de aproximadamente 155 km² para el año 2002, según el documento Esquema Director del *AMSS*.

En este contexto, para el año 2003 se determinó diseñar y utilizar elementos que para entonces aún no eran considerados dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (*SUDS*), para qué, los proyectos contarán con punto de descarga sin afectar a la red de drenajes, que no tenía capacidad hidráulica, iniciándose la implementación del control de escorrentía por medio de sistemas de detención, con el fin de autorizar los permisos de construcción.

Para 2009, se realiza una reforma al *Reglamento de la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los Municipio Aledaños*, incluyendo el artículo V.14, en el que los ya mencionados dispositivos de control de escurrimiento pluvial, como los sistemas de detención o retención, deberán ser considerados en los proyectos u ocupaciones en los que

se generen superficies impermeables, a fin de garantizar la condición de Impacto Hidrológico Cero (*IHC*), dando pie con esto, a la implementación reglamentada de los *SUDS* con énfasis en infraestructuras grises.

Posteriormente, y atendiendo a la necesidad de alternativas sustentables en cuanto a los sistemas de drenaje y a las problemáticas que se generan alrededor de éstos, la *OPAMSS* publicó, en el año 2019, la *Guía Técnica para el Diseño de SUDS en el AMSS*, con lo cual se tiene una herramienta de gran ayuda en manejo de las aguas lluvias con enfoques en la adaptación al cambio climático, aporte en la calidad ambiental del entorno y mejora paisajista incluido el microclima.

1.3 Planteamiento del problema.

El desarrollo urbanístico del Área Metropolitana de San Salvador y los municipios aledaños, ha traído consigo la impermeabilización de grandes áreas de suelo. Esto, aunado al final de la vida útil de los sistemas de drenajes existentes, con sus fallas estructurales, debido entre otros, a la sismicidad del Gran San Salvador, a la falta de mantenimiento y al aumento de precipitaciones por efecto del Cambio climático, ha permitido que, con el correr del tiempo, las ciudades que lo componen tengan dificultades en cuanto a la seguridad y al tránsito durante las inundaciones generadas con la llegada de cada época lluviosa. Estas inundaciones producen afectaciones de diversa índole, como por ejemplo: obstaculizando vías con gran tránsito, poniendo en riesgo la seguridad de los transeúntes y generando daños económicos y ambientales en la infraestructura.

Por otra parte, las construcciones existentes no cuentan, en su mayoría, con drenajes adecuados a las circunstancias actuales, incluso se puede encontrar una mezcla de aguas lluvias con aguas grises y negras en muchos sectores del *AMSS*, tampoco toman en cuenta características de sostenibilidad dentro de sus sistemas, siguiendo un modelo tradicional de construcción, en el que se produce la impermeabilización total de los suelos y no se consideran los riesgos asociados.

La *OPAMSS* ha elaborado guías técnicas que faciliten la implementación de *SUDS* dentro de los diseños y estructuras existentes y por construir; sin embargo, el sector construcción en El Salvador ha explorado poco los costos y beneficios que estos sistemas otorgan en aspectos económicos, sociales y ambientales.

1.4 Objetivos.

Objetivo General:

Desarrollar una propuesta con enfoque económico, ambiental y social para la aplicación de *SUDS* en edificaciones existentes en el *AMSS*.

Objetivos Específicos:

- Identificar sitios de estudio que sean de relevancia para la población en cuanto a la ocurrencia de afectaciones por inundaciones en la época lluviosa.
- Realizar el análisis hidrológico e hidráulico para determinar la cantidad de agua que se deposita en los sitios de estudio a determinarse.
- Diseñar una propuesta de *SUDS* para sitios específicos, a fin de presentar el escenario en una posible modificación de las condiciones de los sitios específicos.
- Elaborar una propuesta en que se sustenten los beneficios tanto económicos y sociales, como hidráulicos, al implementar *SUDS*, incluyendo los presupuestos de las obras necesarias.
- Presentar los beneficios económicos, sociales y ambientales de modificar o intervenir algunos puntos, de las redes de drenaje actuales, implementando Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (*SUDS*), diseñando propuestas con costos de inversiones definidos.

1.5 Alcances.

- Los puntos estudiados serán determinados a partir de la importancia de la afectación que genera en la población.
- Generar un análisis de microcuencas para los sitios estudiados a fin de determinar parámetros de diseño.
- La investigación está orientada a la comparación de los Sistemas de drenaje actuales y su mejoramiento con la implementación de *SUDS*.
- La propuesta generada con esta investigación pretende proveer de un insumo y un incentivo para la implementación de *SUDS* dentro del Área Metropolitana de San Salvador (*AMSS*).

1.6 Limitaciones.

- Debido a las condiciones sanitarias mundiales, específicamente por la pandemia de COVID-19, las investigaciones no tendrán parte de ejecución en campo, y se harán a través de datos existentes en diferentes fuentes.
- El área geográfica priorizada para el desarrollo de la propuesta será la definida en conjunto con la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (*OPAMSS*).
- Las inundaciones analizadas serán de carácter urbano y derivadas de las fallas de los Sistemas de drenaje existentes, y no a raíz del rebalse de ríos o quebradas.
- Las Conclusiones finales estarán basadas en el análisis de puntos específicos con afectaciones notables, analizadas a partir de los criterios establecidos.

1.7 Justificación.

La expansión urbana del *AMSS*, ha alcanzado en la actualidad grandes proporciones, y junto con esto, las zonas verdes y terrenos permeables, han ido disminuyendo poco a poco. Esta región cuenta con una extensión territorial que representa el 3% de todo el territorio nacional, unos 610 km², de los cuales el 32% son zonas urbanas y/o urbanizables; además, aquí se concentra el 27% de la población total del país, alrededor de 1,767,102 habitantes (2015), alcanzando una densidad poblacional de 2,897 hab/km² y de la cual el 97% es población urbana.

La necesidad de crear nuevos y mejores sistemas de drenaje y mejorar los existentes en esta gran urbe se convierte en un tema crítico conforme pasan los años; además, es importante mencionar lo primordial que se vuelve la sostenibilidad dentro del desarrollo constructivo de estos sistemas.

La generación de riesgos sociales, ambientales y económicos por los drenajes existentes en las metrópolis debe de ser estudiado y puesto en práctica para evitar desastres con consecuencias diversas.

Las lluvias en el *AMSS* generan condiciones de vulnerabilidad en muchos puntos estratégicos y de suma importancia para el desarrollo y bienestar de los habitantes; además, de provocar problemas en las cercanías de ríos y quebradas que, al recibir un caudal recogido por todas las zonas impermeabilizadas dentro de las ciudades tienden a desbordarse y poner en riesgo la vida y las

pertenencias de las personas asentadas a las riberas. Solo en el periodo de 1900 a 2013 se registraron alrededor de 15 eventos importantes de inundaciones en El Salvador, que han afectado a 429,342 habitantes y ocasionado pérdidas económicas estimadas en mil millones de dólares al País. Estos problemas seguirán ocurriendo, mientras no se adopten medidas que ayuden a orientar las aguas lluvias de una manera más ordenada y que colaboren, además, a que el ciclo del agua sea un proceso más completo, y que el vital líquido pueda llegar de forma más directa y lo menos contaminada posible a los mantos acuíferos.

Es por esto que el concepto de drenajes sostenibles como los *SUDS*, son elementos necesarios en el desarrollo de las ciudades y su implementación en zonas ya urbanizadas, que en su mayoría cuentan con lotes privados, una característica común del área urbana del *AMSS*, que concentra el 40% de los establecimientos económicos del país y el 33% del PIB nacional.

Por esto es de suma importancia analizarlos desde varios puntos de vista, para tener un conocimiento más concreto en cuanto a su utilidad y factibilidad de aplicación dentro de las construcciones existentes. Aparte, los beneficios que traería para la población en general la implementación de estos sistemas en espacios públicos, históricamente conocidos por los problemas causados por las lluvias.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción.

En este capítulo se abordará la teoría necesaria para comprender la problemática de las inundaciones en las ciudades, de las soluciones de drenaje convencionales que por mucho tiempo han sido aplicadas y de las nuevas propuestas que ya se han iniciado a aplicar, con enfoques de sostenibilidad dentro del AMSS.

Primero se analizarán las causas de las inundaciones, que tienen su origen en la interrupción del Ciclo Hidrológico como consecuencia del desarrollo y expansión de la infraestructura urbana y el Cambio climático, que amenaza cada vez más con severas afectaciones.

Se trata de exponer de forma clara y breve lo relativo al Clima de El Salvador y como este afecta o incide en el territorio; también se presentarán algunas formas de clasificación de inundaciones, basados en estudios a nivel nacional y regional y como estas impactan a las ciudades, en aspectos ambientales, sociales y económicos. De este último aspecto se presentan algunas cuantificaciones económicas de daños generados en El Salvador por efecto de los fenómenos atmosféricos e inundaciones en general, más no los generados específicamente por inundaciones urbanas.

Luego se mostrará como el drenaje convencional ha sido una solución empleada por muchas civilizaciones a lo largo y ancho del planeta y la historia de cómo se componen estos sistemas, con una breve explicación del funcionamiento de sus elementos; además, se describe la condición actual de la Red del alcantarillado pluvial del AMSS, detallando sus deficiencias en diferentes aspectos; esto último, como parte de una serie de lineamientos que se han seguido a través de los últimos años, y que rigen las configuraciones de las redes de drenaje. Estas Normas y Leyes son importantes, debido a que son un punto de partida para entender el estado actual de los drenajes convencionales e identificar las

diferencias y ventajas que se tienen en la implementación de nuevas alternativas sostenibles.

Estas nuevas alternativas de drenaje vienen dadas a raíz de conceptos generados por los efectos causados por el Cambio climático, que se ha evidenciado en las últimas décadas, en las que se ponen en boga las definiciones de sostenibilidad y todos los desafíos que esto conlleva, los objetivos planteados y los lineamientos necesarios para generar ciudades sostenibles que se adapten y contribuyan al mejoramiento de las condiciones ambientales, y al desarrollo necesario para estas.

Es así como se introduce el concepto de los Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles (*SUDS*), para el cual se desglosará de manera ordenada, las características que ayudan a comprender su origen, ventajas, funcionamiento, y las comparaciones con respecto a los drenajes convencionales.

También se abordará el diseño de los *SUDS*, con base en la “Guía técnica para el diseño de *SUDS* en el *AMSS*” desarrollada por la *OPAMSS* y que por simplicidad en este trabajo se hace referencia a ella como “la guía *SUDS*”. Este aspecto se iniciará con definir el proceso de diseño de los *SUDS*, el cual está conformado por 3 fases; en la fase 1 se genera la caracterización de la zona del proyecto, en la cual se definen los datos de partida y los estudios y análisis necesarios a realizar; la fase 2 es en la que se crea un modelo conceptual también llamado “cadena de drenaje” en la que se define como se dará el manejo de las aguas lluvias a través de las técnicas *SUDS* y finalmente, en la fase 3 se realiza la comprobación hidrológica e hidráulica de cada sistema considerando los requerimientos a la entrada y a la salida; además, se definen los aspectos constructivos y de mantenimiento que se deberán cumplir para cada uno de ellos, así como un modelo de simulación que de preferencia puede ser a través de un software especificado.

2.2 Inundaciones urbanas.

2.2.1. Causas de las inundaciones.

La frecuencia y diversidad de amenazas naturales, la magnitud de los daños y pérdidas materiales y humanas asociadas con estas en los últimos años ha generado una reflexión y un debate sobre los factores ajenos a los eventos físicos en sí, que podrían ayudar a explicar los niveles de destrucción e impacto sufrido en la economía y sociedad. Una explicación en torno a esta reflexión es la llamada vulnerabilidad social o vulnerabilidad humana, ante lo cual se hace necesaria la gestión en la reducción del riesgo (López Ramos, 2021).

En este contexto, se vuelve fundamental repasar algunos conceptos básicos relacionados con la gestión del riesgo que permitirán entender el porqué del proceso de la formación de las inundaciones. Según el SHN¹ y el SNET² se entiende por Amenaza, al peligro latente que representa la posible manifestación dentro de un periodo de tiempo y en un territorio particular de un fenómeno de origen natural, socio-cultural o antropogénico, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios, y el ambiente. En este contexto la Vulnerabilidad, es el factor de riesgo interno de un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado, de ser susceptible a sufrir un daño, y de encontrar dificultades en recuperarse posteriormente. Corresponde a la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un fenómeno peligroso de origen natural o causado por el hombre se manifieste; el Riesgo, es la probabilidad que se presente un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un periodo de tiempo definido y se obtiene de relacionar la amenaza con

¹ SHN: Servicio Hidrológico Nacional del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos naturales.

² SNET: Servicio Nacional de Estudios Territoriales, ahora Dirección del Observatorio Ambiental.

la vulnerabilidad de los elementos expuestos. El Desastre, es la situación o proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población, causa alteraciones intensas, graves y extendidas en las condiciones normales de funcionamiento de la comunidad, requiriendo de una respuesta inmediata de las autoridades y de la población para atender los afectados y restablecer umbrales aceptables de bienestar y oportunidades de vida.

Según lo anterior, los eventos hidrometeorológicos que tienen un período de recurrencia anual, que no son de altas magnitudes y que pueden ser considerados como promedios o incluso por debajo del promedio (considerados como amenaza cuando se relaciona con la vulnerabilidad y los cambios hechos por el hombre, ya que la precipitación en sí misma no es una amenaza), han sido capaces de generar desastres para una población urbana considerada muy vulnerable.

Por lo anterior, vemos que lo que debe hacerse es respetar la naturaleza, sus manifestaciones y sus ciclos; es importante entonces conocer el Ciclo Hidrológico, el cual es la representación simplificada de la formación y circulación del agua en la tierra.

El Ciclo Hidrológico.

El proceso del ciclo hidrológico comienza con la energía que se recibe del sol; los continentes y los océanos, que pierden agua por evaporación, pasando ese vapor de agua a la atmósfera y condensándose en forma de nubes. La saturación de vapor del agua en las nubes conduce a las precipitaciones, las cuales se manifiestan en forma de lluvia, nieve o granizo, que alcanzan los continentes y por tanto esa agua precipitada es conducida por los ríos hasta los océanos.

Del total de agua de las precipitaciones, una parte circula por la superficie como escorrentía, otra se evapora, y una tercera se infiltra en la tierra para formar el

caudal base de los ríos, es decir, las aguas subterráneas que alimentan los caudales de los ríos cuando cesan las precipitaciones. Las aguas que tienen su destino en las corrientes subterráneas procedentes de la lluvia se infiltran por gravedad a través de los poros huecos de la tierra, hasta una profundidad límite, en la cual los poros rocosos están tan anegados o saturados, que el agua no puede penetrar más. En el subsuelo se forman entonces dos zonas: una profunda (saturada) y otra llamada de aireación o vadosa (no saturada). En la zona de aireación se producen fenómenos de transpiración, por un lado, debido a las raíces de las plantas, y por otro a causa del ascenso del agua por capilaridad desde la zona saturada hacia la superficie.

Cuando las aguas consiguen salir a la superficie, sea por capilaridad, presión, u otros, pueden quedar bajo los efectos de la energía del sol, y por tanto se evaporarán y seguirán de nuevo el Ciclo Hidrológico, en otro estado físico.

El hombre a través de sus actividades altera el ciclo hidrológico en muchas formas; por lo que es obvio, que, para su subsistencia y desarrollo, debe aprovechar los recursos hídricos y; así mismo, modificar el uso de la tierra y de los suelos. Cuando este aprovechamiento es desequilibrado, los efectos de su alteración se evidencian físicamente convirtiéndose algunos casos en amenazas para el ser humano.

Los factores del Ciclo Hidrológico que influyen directamente en la generación de escorrentía superficial, y por tanto en las inundaciones, son:

Factores de lluvia:

- a) Intensidad: altura de precipitación por unidad de tiempo (mm/h).
- b) Duración: periodo de ocurrencia de la lluvia (minutos u horas).
- c) Frecuencia: medida de la probabilidad de ocurrencia de eventos iguales o mayores al que se analiza; usualmente se relaciona con el Periodo de Retorno.

- d) Patrón: variación temporal y variación espacial. Temporal representado por el hietograma de la lluvia y Espacial representado por el área receptora de la cuenca.

Los factores de lluvia no son afectados directamente por los procesos de urbanización, pero si influyen muchísimo en la generación de una inundación en cuencas pequeñas. Una lluvia más intensa (cantidad de lluvia por unidad de tiempo) concentra una mayor cantidad de agua en el suelo y si la tasa de infiltración en el suelo o la velocidad de escurrimiento a los drenajes, es menor que la intensidad de la lluvia, se comienza a generar más cantidad de agua escurriendo en el suelo y por ende hacia los drenajes, desbordándolos y produciendo inundaciones.

Factores de la cuenca:

- a) Morfometría: El tamaño y la forma de la Densidad de drenajes es quizás uno de los parámetros más importantes ya que habla de la dinámica erosiva de la red hidrográfica.
- b) Uso del suelo: lugares que nunca antes padecían el fenómeno, pues la sección hidráulica absorbía perfectamente el caudal máximo o pico, ahora sufren inundaciones después de una severa impermeabilización por urbanización aguas arriba. El Cuadro 1 muestra la distribución en el uso de suelo del AMSS.

Cuadro 1. Usos de suelo del AMSS (2002).

Uso de suelo año 2002	Km²	%
Arbustivo	29.5	4.97
Bosque denso	132.8	27.44
Bosque poco denso	68.9	11.61
Cuerpo de agua	0.0259	0.004
Cultivo	155.36	26.19
Llanura aluvial	4.52	0.76
Sin vegetación	1.53	0.26
Tejido urbano continuo	129.03	21.75
Tejido urbano discontinuo	41.61	7.01

Fuente: Fernández-Lavado, Caracterización de la inundabilidad en el AMSS, El Salvador, año 2010, pág. 16.

Los cambios a nivel global están afectando los patrones de comportamiento de las lluvias en su distribución temporal y espacial, incrementándose la frecuencia e intensidad de los extremos y produciéndose tormentas altamente convectivas. El cambio del clima y en los patrones de precipitación, se evidencian en: se aumentan los extremos y se hacen más frecuentes, es decir, los desastres generados por lluvias se hacen más frecuentes y las precipitaciones más intensas y altamente convectivas durante la época lluviosa. Este tipo de precipitaciones son las que generan mayor problema de inundaciones en las cuencas pequeñas y urbanas.

En lo que respecta a los factores de la cuenca que pueden alterar el Ciclo hidrológico y alterar los patrones de escorrentía generando mayor amenaza de inundación, básicamente es el uso del suelo, el factor clave. Cuando se reduce o limita la capacidad del suelo a través de la cobertura vegetal para poder detener el impacto del agua y permitirle que ésta permanezca mayor tiempo en el mismo, las tasas de infiltración son mucho más lentas que las intensidades de las lluvias, generando mayor escurrimiento superficial y por lo tanto mayor cantidad de agua que pueda desbordar la capacidad de los drenajes.

Clima de El Salvador.

Grandes cantidades de lluvia sobre una misma área geográfica pueden conllevar a un aumento de los niveles de caudal de los ríos y quebradas. Más concretamente, las precipitaciones de gran intensidad son las que generan las avenidas rápidas o flash-flood³. Según el estudio⁴ “Análisis de riesgo por inundaciones y deslizamientos de tierra en la microcuenca del arenal de

³ Flash-flood: término utilizado en el idioma inglés para los flujos rápidos que pueden producir inundaciones o deslizamientos.

⁴ SNET, Análisis de riesgo por inundaciones y deslizamientos de tierra en la microcuenca del arenal de Monserrat, año 2003.

<https://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00064/doc00064.htm>

Monserrat”, hay inundaciones frecuentes en algunas zonas del AMSS a partir de intensidades de 50 mm/h.

Es por eso que un conocimiento del Clima de El Salvador ayudará a comprender mejor la compleja dinámica hidrometeorológica, donde se mezclan huracanes, tormentas locales, tormentas asociadas a la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), el fenómeno de El Niño y La Niña y otros asociados.

Koëppen publicó en 1936 una clasificación climática completada posteriormente en 1956 por dos de sus alumnos. Según esta clasificación, el Clima que habría en El Salvador corresponde al tipo A_w (ver Cuadro 2):

Cuadro 2. Clasificación climática de Koëppen para El Salvador (1956)

Variable	Clasificación	Características
Temperatura	A	Clima lluvioso tropical. La temperatura media mínima anual es superior a los 18°C.
Humedad	w	Estación seca en verano (noviembre-abril). Lluvias principalmente en invierno (abril-noviembre) con P_{media} anual ~2000 mm.
SABANA TROPICAL		

Fuente: Fernández-Lavado, Caracterización de la inundabilidad en el AMSS, El Salvador, año 2010, pág. 19.

Datos aportados por el antes *SNET*, a partir de un registro mensual de precipitaciones llevado a cabo durante 30 años, hasta el año 2000, reflejan tres zonas en el país según la cantidad de lluvia recibida (ver Cuadro 3):

Cuadro 3. Distribución anual de lluvia en El Salvador según geografía.

ZONA	PRECIPITACIÓN ANUAL
Zona litoral	Costa – 1600 mm Cordillera oriental – 1800 mm Cordillera occidental – 2200 mm
Valles interiores	Occidente – 1700 mm Oriente – 1400 mm
Cordillera norte	>2300 mm

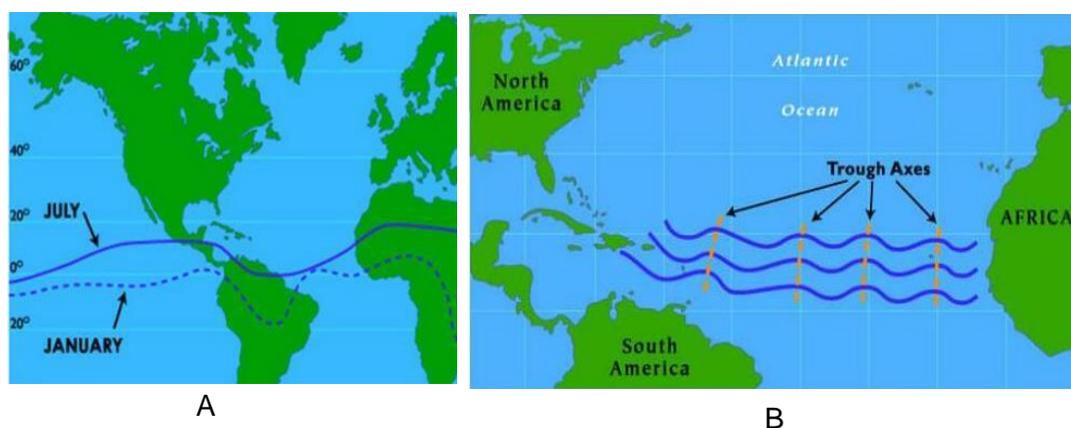
Fuente: Fernández-Lavado, Caracterización de la inundabilidad en el AMSS, El Salvador, año 2010, pág. 19

Esta lluvia, como ya se ha apuntado en la descripción del tipo de Clima, se concentra en la estación lluviosa, de mayo a octubre. Durante la estación seca hay un lapso en el que no hay un solo milímetro de precipitación (Canícula). Por

eso el interés se va a concentrar en la época cuando la probabilidad de que se manifieste el factor desencadenante de la lluvia es más elevada que en el resto del año.

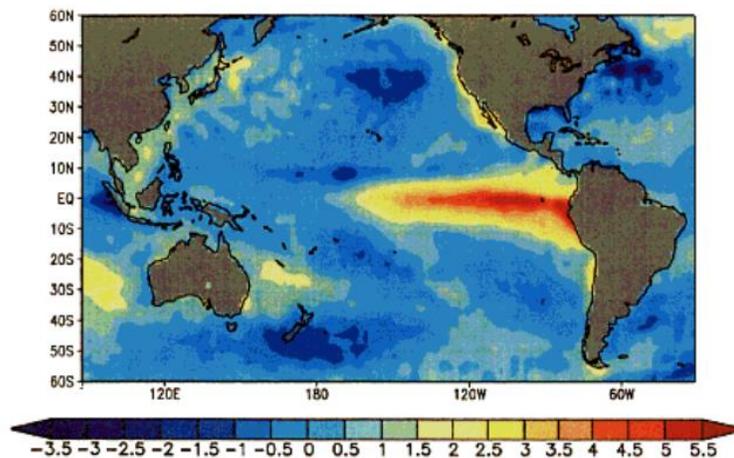
A continuación, se describen los principales fenómenos atmosféricos que afectan a Centroamérica. (ver Cuadro 4)

Fig. 1. (A) Zona de Convergencia Intertropical. (B) Easterly Waves



Fuente: Fernández- Lavado, *Caracterización de la inundabilidad en el Área Metropolitana de San Salvador*, año 2010, pág. 20.

Fig. 2. Fenómeno de El Niño. Se observa un aumento de la temperatura de la superficie del océano en la zona oriental del Pacífico.



Fuente: Fernández- Lavado, *Caracterización de la inundabilidad en el Área Metropolitana de San Salvador*, año 2010, pág. 21.

Cuadro 4. Fenómenos atmosféricos presentes en Centro América.

Tipo de Fenómeno Atmosférico	Descripción
La Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ)	Es una región de los trópicos caracterizada por lluvias intensas donde concurren vientos que soplan hacia el Noroeste y vientos que soplan hacia el Suroeste. Esta varía según la época del año e influye en las épocas seca y húmeda. provoca el ascenso de los vientos húmedos y cálidos que posteriormente sufren un enfriamiento y condensación en forma de nubes y lluvia. Si las condiciones son favorables, algunas de estas tormentas pueden convertirse en huracanes. (Fig. 1)
<i>Easterly waves</i>	Este fenómeno nace en el Noroeste del continente africano, debido al gradiente térmico entre el desierto del Sahara y la zona costera del Golfo de Guinea. Se desplaza hacia la zona occidental del Atlántico transportado por una zona de corrientes en la parte baja de la troposfera. Se cree que el 58% de las tormentas tropicales y huracanes menores son originados por las <i>easterly waves</i> ; mientras que la generación de huracanes de gran intensidad estaría sobre el 83%. (Fig. 1)
Fenómenos asociados a las características orográficas	Cuando una masa de aire se encuentra con una barrera física a la que no puede rodear o atravesar, lo que frecuentemente hace es intentar pasar sobre de ella. El aire caliente y húmedo que llega del Pacífico se encuentra con la cordillera del Bálsamo y el volcán de San Salvador, o también con la cordillera norte del país, entonces hace que el aire ascienda rápidamente, se enfríe debido a una expansión adiabática de aproximadamente 10°C cada 1000 metros y se condense provocando fuertes lluvias.
Fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS).	Es un cambio asociado a las presiones atmosféricas del Pacífico y el Índico. Concretamente con el aumento de presión en el Océano Pacífico tiende a haber baja presión en el Índico. Se le denominó Oscilación del Sur y provoca la circulación del aire situado en altura, desde el oeste hacia el este del Pacífico. Por esto último, el ENOS tiende a suprimir la actividad de los huracanes provenientes del Atlántico, pero hace que aumente en el Pacífico. Tiene dos componentes, una es la temperatura asociada al agua del mar y la otra asociada a las presiones atmosféricas. (Fig. 2)

Fuente: Elaboración propia con información de Fernández- Lavado, *Caracterización de la inundabilidad en el Área Metropolitana de San Salvador, año 2010, pág. 20.*

Cuencas Urbanas.

Una cuenca urbana es una zona de la superficie ubicada en una ciudad en dónde, si fuese totalmente impermeable, toda gota de lluvia que ingrese a la cuenca tiende a ser desalojada por el sistema de drenaje, hacia un mismo punto de salida.

Las características más importantes de una cuenca urbana, comparada con una cuenca rural, reside en el elevado porcentaje de superficie impermeable y la

existencia de una red de drenaje artificial con puntos localizados de entrada de agua.

El crecimiento de las ciudades—inducido por el aumento de la población—provoca un aumento en la superficie impermeable y, como consecuencia directa, origina un mayor escurrimiento de agua lluvia. Los caudales generados por las tormentas deben ser recolectados y transportados a través de los colectores iniciales hasta llegar al punto de descarga, con el objetivo de evitar inundaciones, daños a propiedades y/o suspensión de las actividades cotidianas.

La cuenca urbana está principalmente compuesta por tres elementos: el macrodrenaje, el microdrenaje y la zona urbana. El macrodrenaje comprende los cauces naturales de la cuenca y permite desalojar el agua producto de las lluvias extraordinarias. El microdrenaje considera la red de drenaje pluvial, donde se crean las vías artificiales de una cuenca y permite transportar todo escurrimiento, cuyo gasto es menor o igual al gasto de diseño. La función del microdrenaje es crítico para las zonas urbanas, donde el agua debe evacuarse tan rápido como sea posible. La zona urbana es aquella superficie donde se realizan las diferentes actividades de la población. Forman parte de la misma infraestructura urbana (hogares, escuelas, caminos, puentes, etc.), los servicios públicos (luz eléctrica, agua potable, etc.) y la población que habita en la zona urbana.

2.2.2. Clasificación de las inundaciones.

, las inundaciones urbanas son el resultado de la combinación de extremos meteorológicos e hidrológicos como son las precipitaciones extremas y las corrientes y de actividades humanas en contextos urbanos (Dr. Aragón-Durand, 2014). Por ejemplo, cuando se reducen las superficies y los suelos permeables, y cuando se incrementa la escorrentía, se puede llegar a saturar los sistemas de drenaje. También se debe considerar los asentamientos en llanuras inundables.

Las categorizaciones de las inundaciones se basan en la combinación de tres componentes: fuentes, causas e impactos. Pueden ser inundaciones fluviales, pluviales, costeras, de aguas subterráneas o por fallas de los sistemas artificiales. Si nos basamos en su velocidad, pueden ser inundaciones repentinas, semipermanentes y de generación lenta (ver Cuadro 5).

Cuadro 5. Tipos y causas de las inundaciones en ciudades.

Tipo de desastre	Causas	Ocurrencia
Inundación urbana	Fluvial, costera, repentina, pluvial, subterránea.	Saturación de la capacidad de drenaje y alcantarillado. Falta de permeabilidad debido al incremento en la pavimentación. Sistema de drenaje defectuoso y falta de mantenimiento.
Pluvial y terrestre	Tormentas convectivas, lluvias severas, rotura de un trozo de hielo, terremotos resultantes en deslizamientos de tierra.	Cambios en el uso del suelo, urbanización. Aumento de la escorrentía natural.
Costera (tsunami, oleada de tormenta)	Sismos, erupción volcánica submarina, hundimiento, erosión costera.	Desarrollo en zonas costeras. Destrucción de la flora natural costera (por ejemplo, mangle).
Aguas subterráneas	Alto nivel freático combinado con lluvias severas.	Desarrollo en zonas bajas; interferencia con acuíferos naturales.
Inundación relámpago	Puede ser causada por ríos, sistema pluviales o costeros, tormentas convectivas	Falla catastrófica de presas, infraestructura de drenaje insuficiente.
Inundación semipermanente	Elevación del nivel del mar, hundimiento de la tierra	Sobrecarga de drenaje, falla de los sistemas, inadecuado desarrollo urbano, mala gestión de aguas subterráneas.

Fuente: Dr. Aragón-Durand, Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina, 1ra. Ed., Perú, año 2014, pág. 29.

Los elementos de incidencia humana presentados en la tabla anterior tienen origen en procesos de cambio social como el desplazamiento de la población rural hacia la ciudad, el incremento en la demanda de vivienda y servicios, que en muchas ocasiones sobrepasa la capacidad de atención del municipio o el Estado, lo que a su vez contribuye al desarrollo de asentamientos irregulares que son vulnerables ante los eventos hidrometeorológicos. Para complementar y tener una definición más clara sobre cada uno de los tipos de inundación y sus

causas, mostrados en el cuadro anterior, en el siguiente Cuadro, se definen las causas naturales de los tipos de inundación, de acuerdo al origen y al tiempo de respuesta de la cuenca.

Cuadro 6. Clasificación general de las inundaciones.

Clasificación	Tipo de inundación	Causas naturales
De acuerdo al origen	Pluvial	Precipitación sobre la zona afectada, terreno saturado. Ciclones tropicales, lluvias orográficas, lluvias invernales (frentes fríos), lluvias convectivas.
	Fluvial	Precipitaciones en la cuenca, escurrimiento a los ríos.
	Costera	Aumento del nivel del mar por mareas de tormenta generada por los vientos de los ciclones tropicales y por tsunamis.
	Lentas	Saturación del terreno, pendiente de cauce pequeña.
Tiempo de respuesta de la cuenca	Súbitas o repentinas	Lluvias repentinas e intensas en áreas específicas.

Fuente: Dr. Aragón-Durand, Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina, 1ra. Ed., Perú, año 2014, pág. 29.

Las clasificaciones de los Cuadros 5 y 6 son complementarias entre sí; la primera permite conocer los tipos de inundación y sus causas naturales y antropogénicas, mientras que, en la segunda, se amplía la definición de las causas naturales por tipo de inundación. Es importante conocer cuáles son las características de las causas naturales de una inundación para así poder determinar, cuáles son las causas por incidencia humana. En la práctica, la causalidad es más compleja por lo que se conjugan factores naturales y antropogénicos.

El tipo de inundación que se genera en un territorio específico, depende del tamaño de la cuenca de recogimiento y su capacidad de respuesta, y del tipo de evento hidrometeorológico que lo genera (López Ramos, 2021).

En El Salvador se distinguen los siguientes tipos de inundaciones:

- a) Inundaciones en cuenca baja de ríos medianos y grandes: ocasionada por temporales, eventos hidrometeorológicos como huracanes, principalmente en los meses de septiembre y octubre.

- b) Inundaciones en cuencas de respuesta rápida: ocasionadas por precipitaciones altamente convectivas, intensas y localizadas, de 2 a 3 horas de duración, con ocurrencia principalmente en los meses de mayo y junio.
- c) Inundaciones en cuencas urbanas: También ocasionadas por precipitaciones altamente convectivas, la problemática es generada por deficiencias y limitaciones en el sistema de drenaje urbano, sin obras de control en cauces de ríos y quebradas, basura en las quebradas y por supuesto, incremento de escorrentía por la impermeabilización de la cuenca alta.

Las inundaciones urbanas pueden ser ocasionadas por:

- a) Drenaje urbano: la urbanización aumenta los caudales naturales debido a impermeabilización y la canalización del escurrimiento superficial. Aumenta la frecuencia y la magnitud de las inundaciones. Ejemplo, colapso del drenaje por insuficiente capacidad hidráulica.
- b) Inundación Ribereña: Inundaciones ocasionadas por la ocupación del cauce natural del río y de su planicie natural de inundación, esta zona es ocupada por la población y durante las épocas lluviosas o los años húmedos, se ven casas inundadas.
- c) Intervenciones en el Drenaje: Construcciones de obras en el cauce del río, tales como muros, diques, obras de paso que no han sido adecuadamente diseñadas. Ejemplo: Inundaciones por obstrucciones en cauces.
- d) Flujos de lodo por desprendimiento en zonas más altas. Ejemplo: Flujos provenientes de volcanes o cerros.

2.2.3. Problemática de la urbanización y las inundaciones.

A menudo la gestión de las inundaciones urbanas se caracteriza por un estrecho punto de vista sobre las mismas, se concentra en los aspectos de ingeniería hidráulica y de gestión de las inundaciones y hace caso omiso a los aspectos ecológicos, políticos, socioeconómicos y de riesgos. El Área Metropolitana de San Salvador según el último censo concentra 1,566,629 habitantes.

El 10.4 % de los hogares del AMSS, viven en exclusión social severa⁵ y está ubicada principalmente en áreas de alto riesgo (áreas amenazadas por torrentes, laderas con alto riesgo de deslaves, etc.). El 75 % de las viviendas utiliza el sistema de alcantarillado cloacal, pero menos del 10 % de lo colectado recibe tratamiento. Existe una clara segregación socio-espacial en relación con la exposición de los asentamientos. Muchas de las personas, principalmente del interior del país y con pocos recursos económicos, son migrantes de la zona urbana, quienes no conocen la peligrosidad a la que se exponen y por lo tanto tienden a subestimar el riesgo de vivir en ciertas áreas expuestas, principalmente en las riberas de los ríos o quebradas.

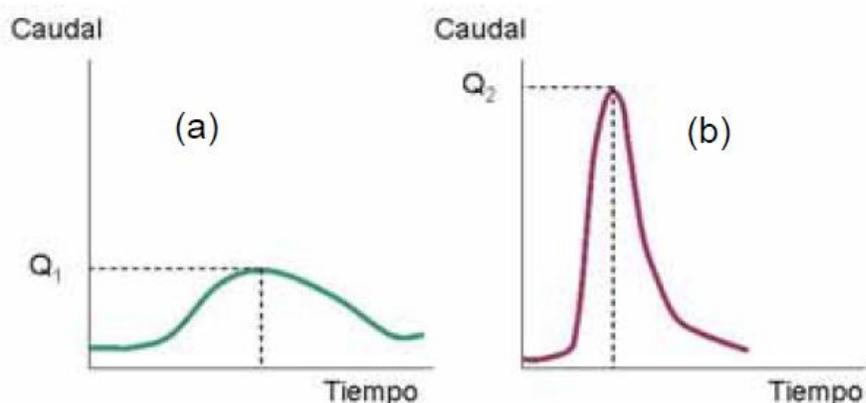
En este sentido, ya se comprobó que las inundaciones en el ámbito urbano tienen su causa principal en la actuación antrópica; por un lado, la falta de recursos de las familias y la inexistencia de políticas de ordenamiento territorial en el AMSS, hacen que un elevado número de viviendas invadan los cauces de ríos y quebradas, y por otro los cambios en el uso de suelo afectan directamente en la escorrentía, infiltración y caudales que circulan por los cauces.

⁵ Mapa de pobreza urbana y exclusión social, El Salvador, 2010
https://www.sv.undp.org/content/el_salvador/es/home/library/poverty/--mapa-de-pobreza-urbana-y-exclusion-social-el-salvador--volumen.html

Una manera entendible para visualizar los efectos de los cambios de uso del suelo es el que reflejan los hidrogramas. Estas gráficas no son más que representaciones de la cantidad de agua que circula por el río en un periodo determinado de tiempo.

En una situación sin intervención antrópica y sin urbanizaciones, el hidrograma resultante en un punto aguas abajo del río se asemejaría más al gráfico (a) de la

Fig. 3. Relación caudal vs. Tiempo en un área permeable (a) y en un área impermeable (b).



Fuente: Fernández- Lavado, Caracterización de la inundabilidad en el Área Metropolitana de San Salvador, año 2010, pág. 30.

figura 3. La cantidad máxima de agua que circularía sería Q_1 . Con la urbanización, debido a toda la impermeabilización, la escorrentía es mayor y acelera la evacuación de las aguas hacia el punto de observación. Lo que se obtiene ahora es que el caudal máximo es mucho mayor (Q_2) y llega en un periodo de tiempo más corto. Cuesta poco imaginar que las obras de paso deberán ser mayores para evacuar una situación como la planteada en el gráfico (b).

Lo interesante en este análisis teórico, es ver cómo ambos hidrogramas muestran el mismo caudal total, es decir, el área debajo de las líneas de las curvas es la misma. La variación se encuentra en la concentración más repentina de las aguas evacuadas.

La diferencia entre un tramo de ladera cubierta por vegetación y la misma superficie impermeabilizada, puede hacer variar el umbral de escorrentía entre 4 y 250 mm, respectivamente. Mientras que una cuenca adecuadamente vegetada puede llegar a absorber los primeros 70-100 milímetros de precipitación sin que se produzca escorrentía, otra cuenca deforestada o impermeabilizada produce la circulación superficial de agua desde los primeros 5 milímetros de precipitación. Esto se traduce en que la misma cantidad de lluvia provoca ahora, bajo estas circunstancias de deforestación e impermeabilización, mayor probabilidad de que se produzca una inundación, de que sea más virulenta y con menor periodo de tiempo, lo que reduce el tiempo para la evacuación y la respuesta.

El sistema de drenaje natural, dentro de un área urbana, se ve fuertemente modificado y las características hidráulicas alteradas por las actividades diarias, por ejemplo, los vertidos de ripio dentro del sistema de drenaje. Las características de la escorrentía superficial también impactan en la capacidad de carga del sistema superficial de drenaje en las zonas urbanas; por esto, la determinación de las zonas propensas a inundaciones se complica y requiere de una mayor capacidad de los sistemas de drenaje.

Los sistemas de drenaje urbano, compuesto de canales, alcantarillas, desagües etc., están destinados en teoría a impedir inundaciones transportando las aguas pluviales fuera de los sitios vulnerables; principalmente se hacen con el objetivo de drenar el agua pluvial, tan rápido como sea posible fuera de la ciudad. Esta práctica puede ser benigna en las ciudades costeras o en las aglomeraciones donde no hay exposición aguas abajo. Pero si las ciudades o distritos urbanos de la cuenca alta desaguan demasiado rápido, puede causar inundaciones urbanas aguas abajo, como ha sucedido en la comunidad Granjeros 2 de San Salvador, a raíz del paso del huracán Ida (2009), aunque cabe mencionar que ya está ubicada sobre depósitos de meandro, en el área de influencia del río, y por tanto en zona inundable.

El drenaje urbano sostenible debe ser adecuado y no excesivo, a fin de mitigar inundaciones locales, sin crear nuevos riesgos aguas abajo. A esto hay que añadir que los sistemas de drenaje urbano requieren un mantenimiento continuo y que, en el país en general, es insuficiente, ya que en general está deteriorado, ha colapsado o está bloqueado, por lo que se interrumpe y ocasiona retenciones y bolsas de agua.

A medida que aumenta la urbanización también crece el porcentaje de áreas impermeables. La parcela de la lluvia que en la situación previa a la urbanización se infiltraba y/o se retenía en el lugar (almacenamiento en depresiones, pequeños charcos, etc.) pasa a formar parte del escurrimiento superficial urbano. La ejecución de obras que conectan entre sí a las superficies impermeables (canaletas, canales, conductos, etc.) producen, a su vez, la concentración y la aceleración del flujo, hecho que genera mayores caudales hacia aguas abajo.

Las consecuencias de las modificaciones introducidas sobre el sistema de drenaje solo se aprecian con posterioridad, durante la ocurrencia de tormentas severas. En algunos casos la combinación de efectos resulta en inundaciones inesperadas sobre áreas urbanizadas, aun bajo lluvias no muy intensas. Una característica causante del descontrol observado en la mayoría de las ciudades es que quien impermeabiliza no sufre las consecuencias, los efectos hidrológicos se verifican aguas abajo. Otro problema típico es la habilitación de lotes en lugares naturalmente inundables, tales como áreas próximas a canales, quebradas y cursos naturales de drenaje. En términos del escurrimiento estas zonas representan áreas de almacenamiento temporal que provocan una regulación natural de los volúmenes escurridos, implica la reducción de los caudales picos hacia aguas abajo, o sea atenuación de los hidrogramas. En estado natural estas áreas son ocupadas por las aguas, en promedio, cada dos años.

Cuando la peligrosidad de inundaciones se asocia al desbordamiento de corrientes fluviales durante crecidas y avenidas, el fenómeno más frecuente, la ordenación del territorio puede resultar de utilidad en la disminución de la intensidad y frecuencia de los fenómenos hidrológicos desencadenantes.

La problemática de controles y normativas en las nuevas construcciones se evidencia cuando una nueva lotificación es proyectada, en donde usualmente los municipios solamente exigen que el proyecto de drenaje pluvial asegure el drenaje eficiente del sector, sin considerar el impacto del aumento del caudal máximo hacia aguas abajo. Una característica causante del descontrol observado en la mayoría de las ciudades es que quien impermeabiliza no sufre las consecuencias; los efectos hidrológicos solo se verifican hacia aguas abajo (López Ramos, 2021).

En muchas ciudades se verifica un proceso de urbanización de las cuencas desde aguas abajo hacia aguas arriba. Como consecuencia, la combinación de impactos de los nuevos lotes produce aumento de la ocurrencia de crecidas e inundaciones hacia sectores de la población antes no afectados. Este proceso ocurre a través de la sobrecarga de la red de conductos subterráneos y/o cursos de mayor porte (López Ramos, 2021).

Existen además otras intervenciones humanas en los ríos que modifican su comportamiento y que se realizan sin considerar el impacto que pueden tener sus efectos aguas abajo. En este sentido, se pueden enlistar los siguientes ejemplos:

- a) **Encauzamiento de Quebradas Naturales**, por tratar de tener más área para construir en las nuevas lotificaciones, o en carreteras, o en calles, no se considera el equilibrio hidráulico del río y se trata de forzar según los requerimientos de la construcción.
- b) **Realización de obras en las quebradas**: Ya sea muros o gaviones para “protección contra inundaciones” de los terrenos aledaños sin un adecuado

diseño, lo que desemboca en un estrechamiento de la quebrada causando inundaciones aguas abajo afectando otras áreas aledañas a la misma.

- c) **Alteración de los patrones de escurrimiento por rellenos y abovedamientos:** la búsqueda de terrenos y más áreas para construir urbanizaciones o edificaciones en una ciudad ocupada, hace que se emboveden quebradas o que se rellenen sus cauces, sin considerar que estos son los drenajes naturales de la quebrada y que, si no drenan por allí, deberán drenar por otra parte, causando problemas en otras áreas.
- d) **Mal diseño de las obras de paso:** También, por razones económicas o técnicas, algunas veces las obras de paso son diseñadas con errores y limitaciones, y se construyen bóvedas y puentes de dimensiones menores a las requeridas, o la estructura inadecuada.
- e) **Basura en los cauces:** El taponamiento de las obras de paso por basura, paradójicamente es una de las mayores causas de inundaciones, que puede ser controlada por las municipalidades y comunidades.
- f) **Producción de sedimentos aguas arriba por urbanizaciones que no controlan sus desechos:** Este es un gran problema durante los procesos constructivos de nuevas urbanizaciones, que puede también ser controlado por regulaciones de las instituciones competentes.

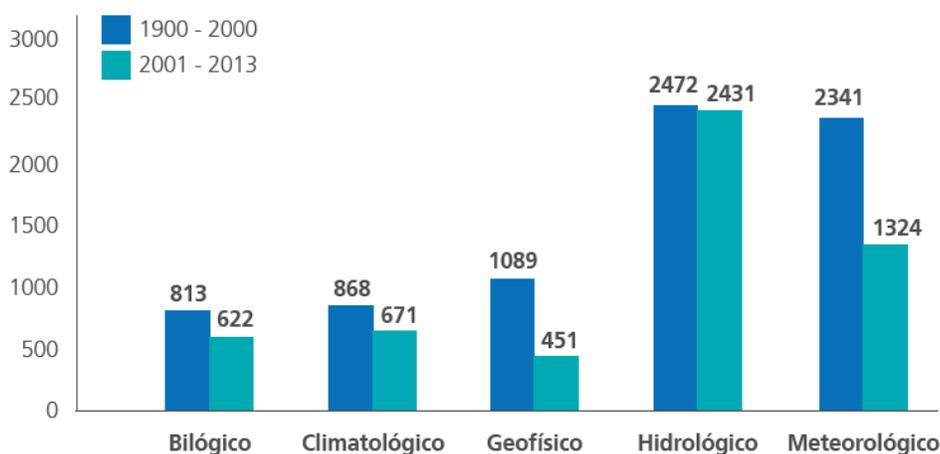
2.2.4. Impactos sociales y económicos de las inundaciones.

El desarrollo de las ciudades latinoamericanas ha tenido consecuencias socioeconómicas, demográficas y ambientales importantes. La dinámica que presentan las sociedades urbanas, sumado a los efectos del cambio climático, ha ocasionado que las ciudades sean más vulnerables ante los fenómenos hidrometeorológicos extremos, entre otros. Las inundaciones urbanas representan un gran desafío al desarrollo, particularmente, a la gente que vive en países en desarrollo (Dr. Aragón-Durand, 2014).

Las catástrofes naturales provocaron a nivel mundial la muerte de 35 mil personas y pérdidas económicas de alrededor de 370 mil millones de dólares. Las pérdidas aseguradas representaron 116 mil millones de dólares, cifra que es el doble a la de 2010. De esa cifra total asegurada, 110 mil millones de dólares correspondieron a las pérdidas aseguradas contra desastres de origen natural. Sólo en la década pasada, los peligros naturales relacionados con el clima causaron 90% de los desastres, 60% de las muertes y 98% de los impactos, la mayoría en áreas de países en desarrollo. Las estadísticas del CRED⁶ estiman que tan solo en el 2013, 23,538 personas fallecieron a causa de desastres debido a la ocurrencia de 362 de estos eventos (Dr. Aragón-Durand, 2014).

De acuerdo con la información del CRED, de 1900 a 2013 ocurrieron 3,263 desastres de todo tipo en el continente americano, superado por Asia con 5,164 desastres para el mismo período. Esta predominancia en frecuencia de los eventos hidrológicos y meteorológicos se observa también en el análisis de períodos más largos de tiempo. Con base en la información estadística del CRED

Fig. 4. Tipo y número de desastres a nivel mundial (1900-2000 y 2001-2013).



Fuente: Dr. Aragón-Durand, *Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina*, 1ra. Ed., Perú, año 2014, pág. 23.

⁶ Centro de Investigación en Epidemiología de los Desastres/Universidad de Lovaina, Bélgica.

se seleccionaron dos períodos: de 1900 a 2000 y de 2001 al 2013. Los resultados se pueden observar en la Figura 4.

En la gráfica se observa que a pesar de que el período de tiempo es diferente, la frecuencia de ocurrencia de desastres no lo es entre un período y otro. En el caso de los eventos hidrológicos (causa de las inundaciones) de 1900-2000, ocurrieron 2,472 desastres y tan solo en los 12 años que corresponden del 2001 al 2013, ocurrieron 2,431. Esto puede indicar que cada vez aumenta más la frecuencia de ocurrencia de los desastres.

El Cuadro 7 muestra los impactos en personas fallecidas, afectadas, y las pérdidas económicas de los desastres ocurridos en el período analizado. Aunque el número de muertes no ha aumentado, (por el contrario, hay una disminución considerable a pesar del incremento poblacional) si hay un aumento en el total de personas afectadas y, sobre todo, un aumento en el impacto económico. Lo anterior se podría explicar por el crecimiento demográfico de las ciudades, la migración cada vez mayor de la población rural a las zonas urbanas y su establecimiento en zonas vulnerables a inundaciones.

Cuadro 7. Impactos sociales y económicos a nivel mundial.

Tipo de desastre	Periodo de años	Ocurrencia (no. De desastres)	Muertes	Total de afectados	Daños totales ('000 USD)
Hidrológico	1900-2000	2,472	6,915,755	2,269,496,214	306,276,509
	2001-2013	2,431	87,031	1,299,519,274	340,194,228
Meteorológico	1900-200	2,341	1,204,684	473,468,928	311,531,537
	2001-2013	1,324	187,784	498,660,712	670,826,541

Fuente: Dr. Aragón-Durand, Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina, 1ra. Ed., Perú, año 2014, pág. 24.

Tanto en América Latina y el Caribe, como en el resto del mundo, las inundaciones son el desastre más frecuente. En el cuadro 8 se muestra cuáles son los países con mayor ocurrencia de desastres para el período de 1900 a 2013, según información del *CRED*.

Los países con mayor incidencia de desastres contrastan con aquellos que ocupan los primeros lugares de pérdidas económicas, como es el caso de Argentina, país con la cifra más grande de daño económico. Este contraste puede deberse al nivel diferencial de vulnerabilidad que tiene cada país y a qué tan resiliente puede ser.

Cuadro 8. Impactos sociales y económicos de la ocurrencia de inundaciones para América Latina y El Caribe 1900-2013.

País	Ocurrencia	Muertes	Población Afectada	Daños totales ('000 USD)
Colombia	71	2,675	15,301,018	3,579,353
Brasil	121	7,404	15,077,504	8,962,254
Argentina	48	836	14,102,249	9,998,210
México	61	4,319	4,837,528	4,549,400
Perú	47	2182	4,001,883	81,000
Bolivia	37	1,074	3,240,925	1,662,118
Ecuador	29	976	1,986,173	1,561,570
Rep. Dominicana	23	841	1,538,075	97,725
Chile	27	1,040	1,443,191	695,600
Honduras	29	952	1,267,832	392,300
Cuba	23	118	1,071,862	202,590
Paraguay	17	137	1,065,110	96,557
Jamaica	13	141	903,712	168,440
Venezuela	29	30,396	900,442	3,497,126
Guatemala	22	908	897,849	180,413
Haití	49	3,978	707,689	1,959
Costa Rica	27	147	633,067	403,000
Nicaragua	19	512	619,722	2,050
Guyana	6	34	468,774	634,300
El Salvador	15	678	429,342	1,281,500
Uruguay	12	23	226,763	89,000
Panamá	35	495	221,757	42,200
Santa Lucía	2	6	172,000	0
Belice	4	16	57,600	12,397
Suriname	3	5	36,148	50
San Vicente y las Granadinas	6	16	14,718	5,000
Bahamas	2	0	1,000	45,000
Barbados	2	3	310	500
Trinidad y Tobago	2	6	210	70
Granada	1	6	0	4,700
Saint Kitts y Nevis	1	0	0	500

Fuente: Dr. Aragón-Durand, Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina, 1ra. Ed., Perú, año 2014, pág. 25.

2.2.5. Impactos del cambio climático en El Salvador.

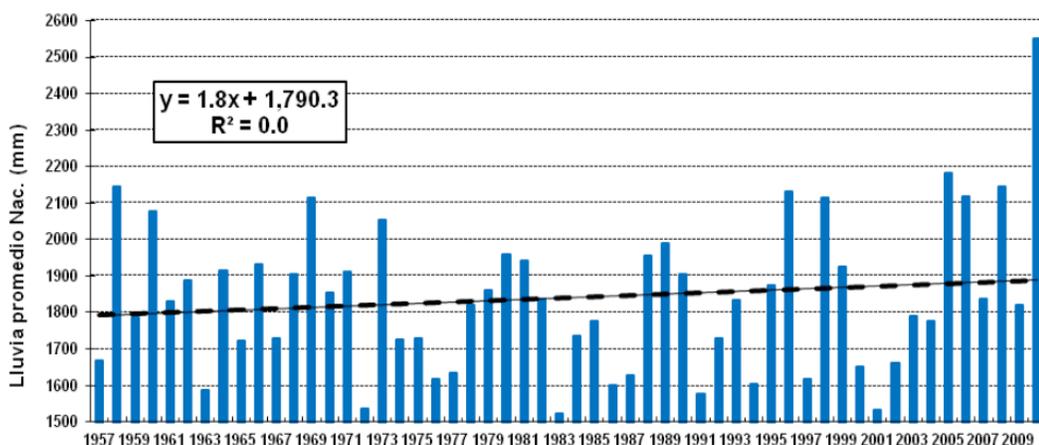
Evolución de la Variabilidad Climática.

La ubicación geográfica de El Salvador en el cinturón tropical, la influencia de las corrientes marinas del océano Pacífico al sur y lo pequeño del territorio permitían que, anteriormente el país no mostrara grandes oscilaciones en la mayoría de los parámetros climáticos durante el año. La temperatura anual variaba relativamente poco con la ocurrencia de los valores mayores hacia el mes de abril y una disminución hacia los meses de diciembre y enero.

El régimen de lluvias, caracterizado típicamente por una estación seca (de noviembre a abril) y una estación lluviosa (de mayo a octubre), se alteró en las últimas décadas durante las que se presentaron diversas anomalías en el patrón temporal y espacial de lluvias (ver Fig. 5), lo que ha derivado en un incremento de los desastres vinculados a fenómenos hidrometeorológicos, tanto por exceso como por falta de precipitación.

Los años 2005 y 2010 han sido los más lluviosos del período en los cuarenta años del período 1971- 2010. En esos mismos años también se observó un

Fig. 5. Lluvia anual promedio nacional, 1957 - 2010.



Fuente: MARN, 2ª. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, El Salvador, año 2013, pág. 28.

calentamiento mayor en el agua superficial del mar en el Atlántico Tropical Norte (ATN), que ha alcanzado los valores más altos registrados en los últimos 150 años y, con ello, las temporadas de huracanes en esa región han sido extraordinarias en intensidad y cantidad.

Nuevos récords de lluvias intensas.

En los últimos años, El Salvador ha registrado lluvias extremadamente intensas y localizadas en zonas muy delimitadas del territorio que han batido nuevos récords. En noviembre de 2009, se estableció un récord de lluvia acumulada en seis horas -350 mm en el Volcán Chichontepec en San Vicente, durante la Baja Presión E96 asociada al Huracán Ida. Ese evento extremo, muy concentrado espacialmente y el primero registrado en el mes de noviembre en la transición hacia la estación seca, provocó un gran deslizamiento en el Municipio de Verapaz, departamento de San Vicente, desbordamientos de ríos, destrucción de puentes, grandes daños a la agricultura, 199 personas fallecidas y 15 mil personas desplazadas y refugiadas.

En mayo de 2010, la Tormenta Tropical Agatha batió el récord de lluvia acumulada en 24 horas (484 mm) registrada en la estación hidrométrica de La Hachadura, ubicada sobre el río Paz, fronterizo con Guatemala. Ese hecho, el primer evento extremo registrado en mayo, también dejó una gran secuela de daños en el occidente del país, entre ellos la destrucción del puente internacional "Manuel José Arce". En 2010, también se estableció un nuevo récord en la lluvia anual: 2,549 mm como promedio nacional, un 41% por arriba del promedio correspondiente al período 1971-2000 (1,812 mm).

En octubre de 2011, la Depresión Tropical 12-E estableció récords de duración (diez días), de lluvia acumulada (1,513 mm en la cordillera del Bálsamo) y de daños y pérdidas: \$840 millones o 4% del Producto Interno Bruto (PIB). En febrero y octubre de 2011 y abril de 2012 también se establecieron récords de lluvia.

Es importante destacar que solamente uno de los tres eventos extremos anteriores alcanzó la categoría de Ciclón tropical (la Tormenta Tropical Agatha); sin embargo, los otros eventos (la Baja Presión E96/Ida y la Depresión Tropical 12E) provocaron lluvias torrenciales, con graves impactos en el territorio, la población y la actividad productiva.

Evolución de los eventos hidrometeorológicos extremos.

En El Salvador, al considerar como eventos extremos hidrometeorológicos aquellos que producen una precipitación arriba de 100 mm en 24 horas y una precipitación acumulada de más de 350 mm en 72 horas, resulta significativo el aumento de esos fenómenos climáticos extremos. Se registró uno en la década de los sesenta, otro en la de los setenta, dos en la de los ochenta, cuatro en la de los noventa y ocho en la primera década de este siglo (ver Cuadro 9).

Cuadro 9. Cantidad de eventos extremos por décadas (1961 – 2011).

Océano	1960	1970	1980	1990	2000	2011
Atlántico	1	1	1	3	4	0
Pacífico Oriental	0	0	1	1	4	1
Total	1	1	2	4	8	1

Fuente: MARN, 2ª. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, El Salvador, año 2013, pág. 31.

Llama poderosamente la atención el incremento de los eventos extremos que impactaron a El Salvador y que tienen su origen en el océano Pacífico, cuando históricamente han sido los generados en el Atlántico los que afectaban en mayor número. En la década de los ochenta, solo un evento provino del Pacífico, al igual que en la de los noventa; en tanto, en la primera década de este siglo fueron cuatro; la segunda década, se inició en 2011 con el impacto de la Depresión Tropical 12E que rompió récords históricos de precipitación, incluso mayores que la lluvia dejada por el devastador huracán Mitch en 1998.

Los fenómenos que afectan al país y que provienen del Atlántico también se han incrementado. En las décadas de los sesenta, setenta y ochenta, se tuvo el

impacto de un evento ciclónico por década; mientras que en los noventa fueron tres y en la primera década del presente siglo fueron cuatro.

Impactos y costos asociados a la variabilidad climática.

Como resultado de la variabilidad climática descrita, el país experimenta un régimen temporal y espacial de lluvias anómalas, lo cual tiene fuertes implicaciones para el bienestar, las actividades productivas y para la economía nacional. Los impactos asociados a estos eventos extremos, además de las pérdidas humanas, también están ocasionando efectos severos y acumulativos en la infraestructura social y productiva, exacerbando las condiciones ambientales y ecosistémicas con repercusiones directas sobre el desarrollo del país.

La variabilidad climática es la principal causa de la fluctuación anual de la producción agrícola en El Salvador como consecuencia de los extremos, tanto de lluvia como de sequía. En el año 2010, las pérdidas por inundaciones en la agricultura superaron los US\$11 millones, y las pérdidas por sequía sumaron US\$38 millones. Los cambios lentos pero inexorables en las condiciones promedio del entorno como temperatura y disponibilidad de agua también afectan este sector, reduciendo su productividad y tornándolo más vulnerable por la mayor incidencia de plagas y enfermedades.

Como resultado de esta dinámica, El Salvador experimentó un incremento de desastres vinculados a eventos hidrometeorológicos extremos. Destacan los tres eventos ocurridos en veinticuatro meses entre noviembre de 2009 y octubre de 2011 (Baja Presión E96/Ida, Tormenta Tropical Agatha y Depresión Tropical 12E) que provocaron daños y pérdidas por unos US\$1,300 millones que, en conjunto, representarían el 6% del PIB de 2011, un porcentaje significativo si se considera el desempeño y evolución que ha tenido la economía nacional para ese mismo período (ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Impactos conocidos más importantes registrados para los últimos eventos hidrometeorológicos extremos en El Salvador.

Impactos conocidos	Baja E96/lda (Nov 2009)	Tormenta Tropical Agatha (Mayo 2010)	Depresión Tropical 12E (Oct 2011)
Muertos	198	12	31
Afectados	122,000	120,000	500,000
Albergados	4,200	14,800	56,400
Precipitación promedio máxima (mm)	483	672	1,513
Precipitación promedio nacional (mm)	248	274	747
Daños y pérdidas (millones US\$)	314.8	112.1	902
Porcentaje de PIB (%)	1.4	0.5	4
Territorio Afectado	Región central	Región oriental y zona costera	Zona Costera y cadena volcánica central
Infraestructura vial	132 carreteras	61 carreteras	40% del total
Centros Escolares dañados	111	378	947
Centros de salud dañados	28	20	257
Pérdidas en agricultura (millones \$)	27.5	11.4	105.3

Fuente: MARN, 2ª. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, El Salvador, año 2013, pág. 35.

Estos datos muestran que el impacto de la variabilidad climática es ya muy significativo en el país. Por ello, El Salvador ha sido clasificado internacionalmente como uno de los países más vulnerables del mundo ante la Variabilidad climática y/o el Cambio climático. La organización Germanwatch elabora anualmente el Índice de Riesgo Climático Global que califica el impacto de los eventos (tormentas, inundaciones, sequías, etc.) sobre los países, con base al número de muertos por cada 100,000 habitantes, y pérdidas en proporción del PIB. El Índice crea un ranking de 177 países. Para 2009, los resultados colocaron a El Salvador en primer lugar de riesgo climático y para el 2011 en el cuarto lugar.

2.2.6. Inundaciones en el AMSS.

Desde tiempos antiguos, El Salvador ha sido afectado por desbordamiento de ríos e inundaciones que han provocado importantes pérdidas materiales y humanas.

Diversas referencias bibliográficas destacan fenómenos hidrometeorológicos extremos acontecidos en los años 1762, 1774, 1781, 1852, 1906, 1922, 1934. Eventos que provocaron inundaciones, pérdidas de vida y daños materiales en diferentes zonas del país.

Asimismo, en 1974, el huracán Fifí produjo graves inundaciones en el país. En 1998, el huracán Mitch y en el 2009, la baja presión E96 asociada al huracán Ida; en el 2010, la Tormenta tropical Agatha y en el 2011, la Depresión tropical 12E. Aunque las inundaciones han ocurrido siempre, el daño y las pérdidas generadas por ellas se han incrementado en los años recientes. La transformación de la morfología del territorio, cambio de usos del suelo y el desarrollo urbanístico han agravado la problemática de inundaciones, afectando diferentes zonas del país y, en especial, a la población de más escasos recursos que habita en asentamientos precarios o cerca de ríos y quebradas. Las inundaciones también han provocado pérdidas en cosechas y animales y daños a infraestructura básica como puentes, carreteras, casas, escuelas y unidades de salud.

El cambio en la distribución espacial y temporal de la lluvia debido al Cambio climático y Variabilidad climática, junto con el incorrecto manejo de las cuencas, ocasiona además de inundaciones, incremento de la erosión, disminución de la infiltración y aumento de la escorrentía superficial, entre otros.

Las inundaciones pueden estar relacionadas a diferentes factores, siendo los principales los relativos a la lluvia y la cuenca. Los factores relacionados a la lluvia son: a) intensidad: cantidad de lluvia por unidad de tiempo (mm/h); b) duración: cantidad de tiempo en que se produce la lluvia, puede ser de corta duración (es el caso de las tormentas) o de larga duración (lluvia tipo temporal); c) frecuencia:

se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un evento con una magnitud igual o superior a una determinada; y d) patrón: que indica la variación espacial y temporal de la lluvia.

Inundaciones urbanas en el AMSS.

Considerando que el Área Metropolitana de San Salvador es el área urbana más extensa del territorio nacional y supone, además, la mayor concentración poblacional y económica que puede ser afectada por las crecidas de las quebradas que constituyen la cuenca alta del río Acelhuate, estudiar sus amenazas se vuelve primordial.

Las inundaciones en la ciudad de San Salvador son un problema antiguo del cual se tiene registro en documentos y periódicos desde inicios del siglo pasado. Las causas de estas inundaciones son complejas y variadas, entre las que se destacan: la poca capacidad hidráulica del cauce en algunos tramos, la ubicación de construcciones ya sea dentro del cauce del río o dentro de la zona de inundación, las obras hidráulicas de capacidad reducida que generan represamiento de los caudales y el incremento de la escorrentía por los cambios de uso de suelo que se han producido en la parte alta y media de la cuenca.

La recurrencia de inundaciones es mayor, principalmente, en los sitios de los barrios de San Jacinto, Modelo, Candelaria, La Vega, Santa Anita, colonia La Málaga, Nueva Israel, Las Palmas, comunidades Granjero I y II, el Coro, Altos de Jardines, Tutunichapa I y III, boulevard Constitución, Alameda Roosevelt y 49 Avenida Sur, colonias Las Mercedes en Mejicanos, Comunidad El Cañito, Costa Rica, Nicaragua, y Santa Marta y zona del Instituto Salvadoreño para el Desarrollo Integral de la Niñez y la Adolescencia (ISNA).

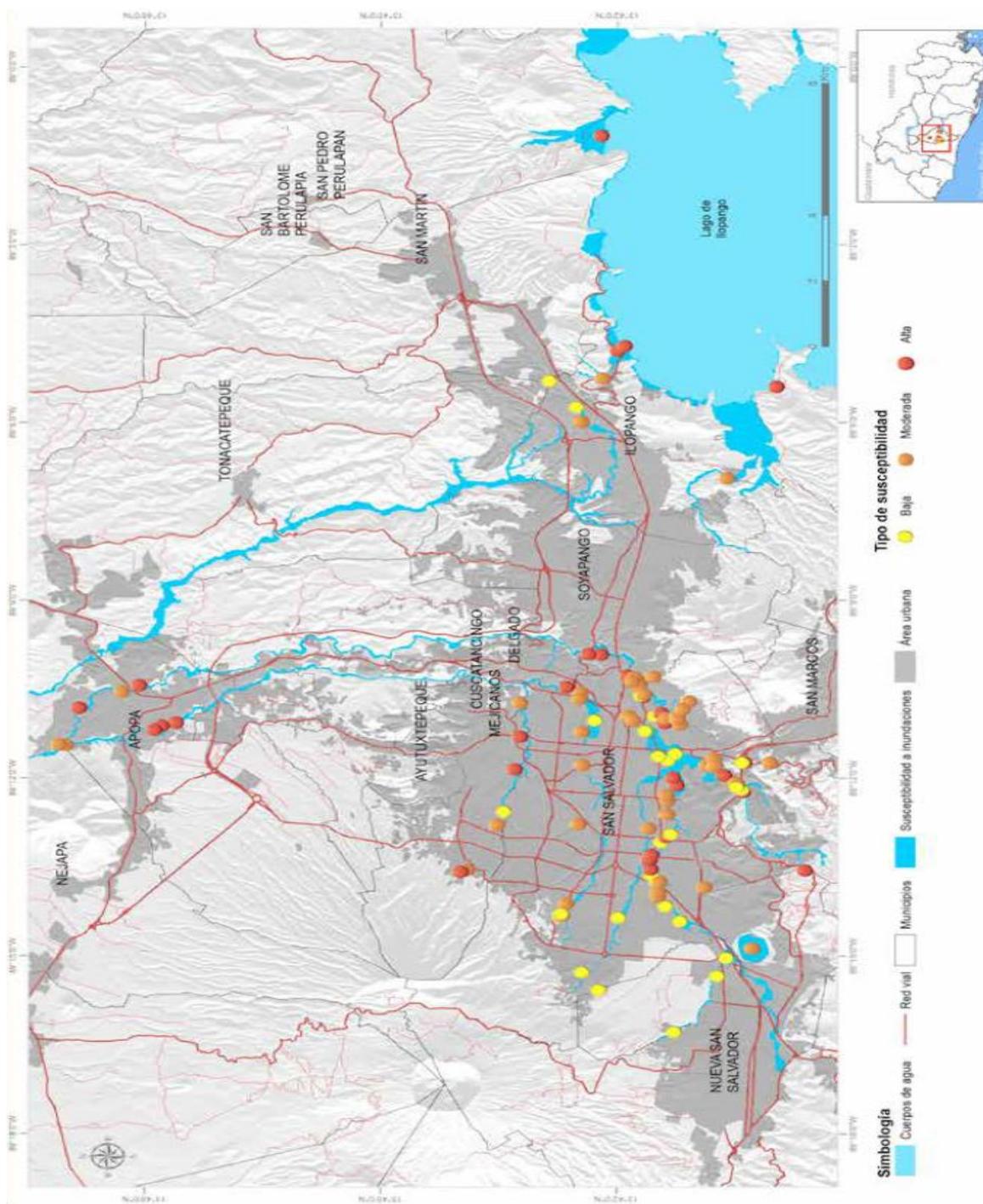
Entre los años 2002 y 2011, se registraron pérdidas de vidas humanas y materiales en la ciudad por diferentes eventos de crecida del Arenal Monserrat. El evento del 3 de julio del año 2008, en el que una lluvia de alta intensidad

ocasionó una repunta que arrastró a un Autobús con 32 personas hacia el cauce del río en la zona de la colonia La Málaga y generó la muerte de sus ocupantes. Posterior a este evento, han sucedido desbordamientos en diferentes sectores de la ciudad con los eventos de la Baja presión asociada a Ida (7 – 8 de noviembre 2009), Tormenta tropical Agatha (29 – 30 mayo de 2010), Depresión tropical 12E (10 – 20 de octubre de 2011).

Mediante recorridos en las diferentes quebradas que constituyen el río Acelhuate, se identificaron los sitios susceptibles a inundación y se clasificaron en categorías baja media y alta (ver Fig. 6).

En el año 2012 se realizaron las modelaciones hidrológicas e hidráulicas en los afluentes del Área Metropolitana de San Salvador. Para la realización de las muestras se consideró las lluvias para diferentes periodos de retorno y duraciones (de 2 y 24 horas), y abarca de esa forma, lluvias de tipo convectivo y temporal, así como el análisis de los diferentes eventos sucedidos en años más recientes.

Fig. 6. Mapa de sitios susceptibles a inundaciones en el AMSS.



Fuente: MARN, Informe del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidades (INERV), El Salvador, año 2017, pág. 75.

2.3 Sistemas de drenaje pluvial convencionales.

2.3.1. Historia de la Red de drenaje pluvial del AMSS.

Drenajes a nivel mundial.

El origen de las redes de drenaje de aguas lluvias nace como respuesta a un problema de índole sanitario. Los primeros antecedentes históricos se indican en la Biblia, (655 a de C.) en su lucha con los jesuitas el Rey David consigue que Joab entre en Jerusalén a través de los canales de desagüe de aguas negras y de lluvia.

El mayor ejemplo de red de saneamiento de la antigüedad, construida en Roma, es la denominada Cloaca Máxima. En sus orígenes era un cauce natural, o torrentera, entre las colinas del Palatino y el Quirinal. Las primeras obras serán realizadas hacia el 200 a.C. por Tarquinio el Viejo, consistiendo fundamentalmente en la consolidación de la zanja. Tarquinio el Soberbio dotará a los muros de un recubrimiento pétreo y la cubrirá con tablas. Por los datos recabados se sabe que la bóveda no se realizó antes del siglo II a. C.

Fig. 7. Cloaca Máxima, parte del gran sistema de alcantarillado de la antigua roma.



Fuente: imagen obtenida en <https://omrania.com/inspiration/urban-water-systems-the-great-sewer-of-ancient-rome/>.

En Inglaterra como en otros países a principios del siglo XIX existían ya conductos para drenaje exclusivo de aguas pluviales sin vertidos de las excreciones humanas. Es a partir de 1815 en Londres donde se inicia esta evacuación.

La Revolución industrial del XIX, tuvo como consecuencia la masificación de la población especialmente entorno a los centros de producción, creándose unas condiciones sanitarias penosas, ello dio lugar a numerosas epidemias de cólera, como la de 1832 y posteriormente la de 1845 con más de 25,000 muertos, que pusieron de manifiesto la conexión entre el estado sanitario del agua de consumo y el desarrollo de enfermedades.

Drenajes a nivel Centroamericano.

En Centroamérica se conoce el caso del Imperio Maya donde sus reyes sostenían a sus pueblos de modos prácticos, ocupándose de la construcción de obras públicas. Al sur de la ciudad Oxkutzcab (estado de Yucatán) en el pie de la montaña Puuc, en el siglo X a.C. el abastecimiento de agua para la población y el riego de los cultivos se hacía a través una tecnología para el aprovechamiento de agua lluvia, el agua era recogida en un área de 100 a 200 m² y almacenada en cisternas llamadas Chultuns, estas cisternas tenían un

Fig. 8. Chultun, cisterna para almacenamiento de agua pluvial utilizada por los Mayas.



Fuente: imagen obtenida en <http://www.explore.mx/cisternas-mayas-para-recolectar-agua-chultunes/>

diámetro aproximado de 5 m, y eran excavadas en el subsuelo e impermeabilizadas con yeso (Fig. 8).

En Cerros, una ciudad y centro ceremonial que se encuentra en el actual Belice, los habitantes cavaron canales y diques de drenaje para administrar el agua de lluvia y mediante un sistema de depósitos, estos permitían que la gente permaneciera en la zona durante la estación seca cuando escaseaba el agua potable (año 200 d.C.).

Drenajes a nivel de El Salvador.

Las primeras alcantarillas de San Salvador se construyeron a principios del siglo XX. Constaban de canales rectangulares de mampostería de ladrillo, construidas para el desalojo de aguas lluvias y negras del área central de San Salvador. En 1920, con motivo de la pavimentación de la ciudad se construyeron nuevos colectores, separando las aguas lluvias del alcantarillado sanitario; habiéndose adoptado tuberías de concreto. Un colector de sección Ovoide de 2.10 x 1.40 metros, conocido como el colector Alcaine, fue instalado en 1928 para interceptar las alcantarillas del área central de la ciudad y transportarlas las aguas residuales hasta un tributario del río Acelhuate.

En 1961 se crea la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (*ANDA*), institución autónoma de servicio público, cuyo objetivo principal según su ley fue la de “proveer y ayudar a proveer a los habitantes de la República de acueductos y alcantarillados”.

Con fondos del Estado y préstamo del Banco Interamericano de Desarrollo (*BID*) se inició entonces una notable mejora del sistema metropolitano de alcantarillado sanitario. Bajo este programa se realizó la construcción de tres colectores primarios para interceptar la mayor parte de las descargas a los ríos y quebradas que atraviesan la ciudad. Los Colectores se diseñaron para drenar la mayor parte

de San Salvador, incluyendo Ayutuxtepeque, Mejicanos, Cuscatancingo y las aguas negras de Santa Tecla, dado que desde el abandono de su planta de tratamiento sus aguas negras eran descargadas en la quebrada El Piro. Posteriormente se construyó un cuarto colector para atender la parte oriental de la ciudad, incluyendo la zona industrial del Boulevard del Ejército.

Las descargas fueron diseñadas para una vida útil de 20 años, es decir para 1982. Ello permitió estimar una población total de 670,000 habitantes, cubriendo un área de 4,990 hectáreas, con densidad de drenaje por persona estimada de 128 hab/ha. La dotación para el consumo de agua potable fue estimada en 300 l/hab/d.; las velocidades de diseño variaron entre 0.6 y 3.5 m/s; los pozos de visita se separaron a cada 100 m. El caudal de diseño de los 4 colectores es de 7.93 m³/s.

Como resultado de gestiones ante el *BID*, en las décadas de los 80 y 90 se implementó una segunda fase en la que se construyeron colectores de gran diámetro para reunir las redes sanitarias parciales y conducir dichos caudales fuera del Área Metropolitana. Estos colectores tienen la capacidad para conducir el caudal generado por el *AMSS* a dos puntos de aguas abajo de la ciudad. Uno de estos colectores cubre la mayor área de ciudad captando aproximadamente el 60% del caudal, siendo que el mismo fue construido paralelo al río Urbina-Tomayate. El otro colector fue construido paralelo al río Las cañas y recibe parte de la diferencia de caudal total (15%).

2.3.2. Componentes de la Red de alcantarillado pluvial.

Los sistemas de drenaje pluvial se definen como el conjunto o sistemas de obras, instalaciones y servicios que tienen por objeto canalizar la escorrentía generada por las precipitaciones hasta los cuerpos receptores. Tal conjunto o sistema comprende los tragantes, cunetas, canales, alcantarillas pluviales con sus pozos

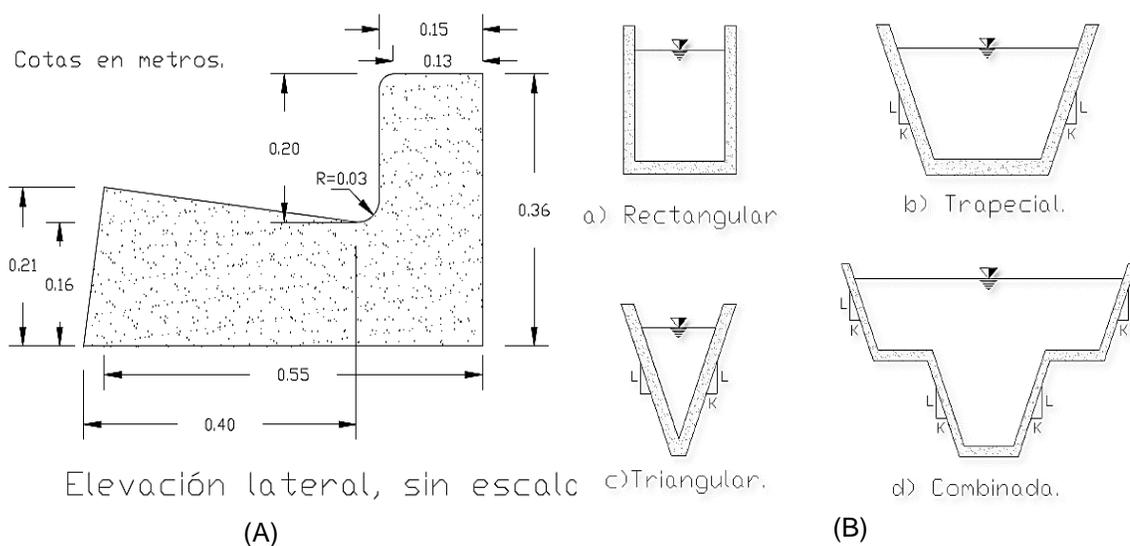
de visita, colectores maestros de descarga, sistemas de detención de aguas lluvias y obras civiles para las descargas a los cuerpos receptores⁷.

A continuación, se describe cada uno de los componentes mencionados anteriormente.

a) **Estructuras de captación.** Son el conjunto de elementos destinados a recolectar las aguas lluvias para su posterior evacuación y están compuestas por:

Cunetas o canaletas: son aquellas estructuras que recolectan el agua que escurre sobre la superficie del terreno y la conducen al sistema de alcantarillas. En el caso del AMSS es la franja del derecho de vía ubicada a ambos lados del rodaje contiguo al cordón, construida para el drenaje superficial de las aguas lluvias (Fig. 9).

Fig. 9. (A) Detalle típico de una cuneta o canaleta. (B) Secciones transversal típicas.

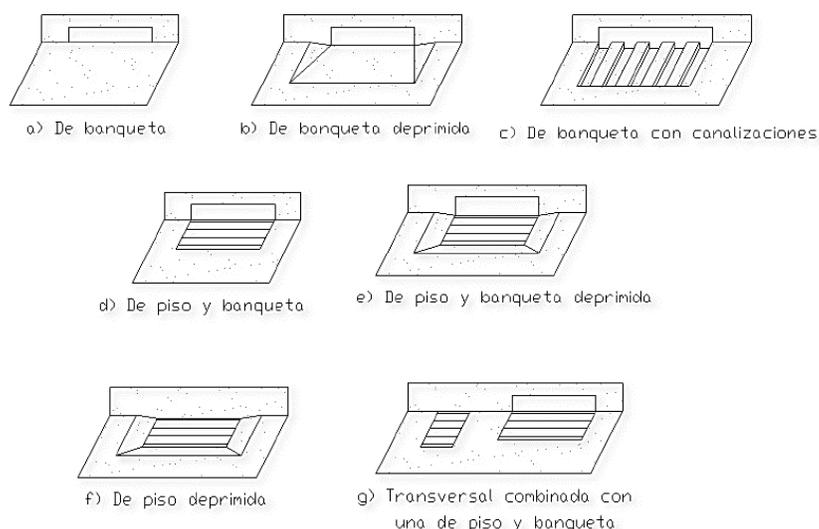


Fuente: Tesis Rediseño del sistema de alcantarillado sanitario, alcantarillado pluvial y propuesta de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Armenia, Autores Ginelly V. López y Francisco A. Rodríguez, UES, El Salvador, 2012, pág 13.

⁷ Reglamento de la Ley de Urbanismo y Construcción en lo Relativo a Parcelaciones y Urbanizaciones habitacionales.

Tragantes o sumideros: son estructuras verticales que permiten la entrada del agua de lluvia a los colectores, reteniendo parte importante del material sólido transportado. Están constituidas por una caja que funciona como desarenador, donde se depositan los sólidos en suspensión que arrastra el agua y por una coladera con su estructura de soporte que permite la entrada del agua que circula sobre la superficie del terreno al sistema de alcantarillado. Los tragantes pueden ser de varios tipos: de piso, de banqueta, combinadas, longitudinales y transversales (ver Fig. 10).

Fig. 10. Tipos de tragantes más comunes.



Fuente: Tesis Rediseño del sistema de alcantarillado sanitario, alcantarillado pluvial y propuesta de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Armenia, Autores Ginelly V. López y Francisco A. Rodríguez, UES, El Salvador, 2012, pág. 15.

- b) **Estructuras de conducción.** Son todos aquellos elementos que transportan las aguas recolectadas por las estructuras de captación hacia sitios de descarga final. Representan la parte medular de un sistema de alcantarillado y se forman con conductos cerrados y abiertos.

Clasificación de las alcantarillas pluviales o colectores:

- **Colectores secundarios:** Son las tuberías que recogen las aguas de lluvia desde los tragantes y las conducen a los colectores principales. Se sitúan enterradas, bajo las vías públicas.
- **Colectores principales:** Son tuberías de gran diámetro, conductos de sección rectangular o canales abiertos, situados generalmente en las partes más bajas de las ciudades, y transportan las aguas pluviales hasta su destino final.

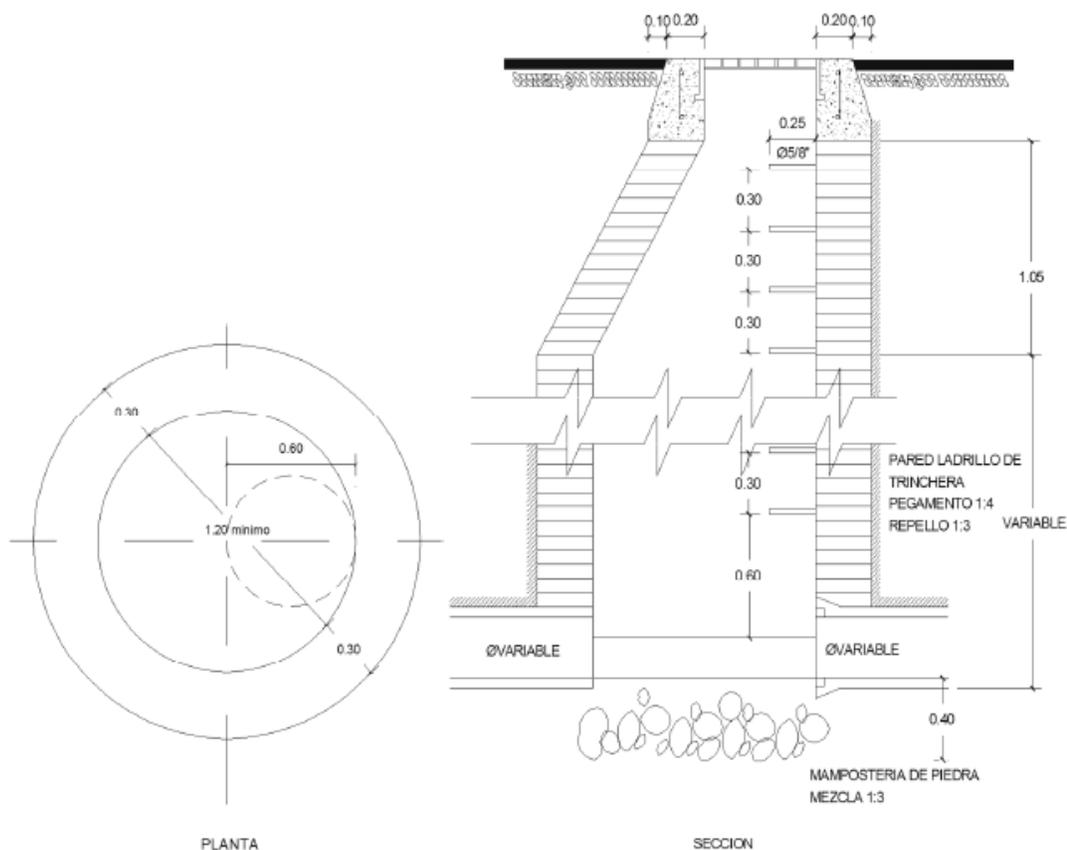
Por razones de economía, los colectores y emisores deben tender a ser una réplica subterránea del drenaje superficial natural. El escurrimiento debe ser por gravedad, excepto en condiciones particulares donde se requiera usar bombeo.

- c) **Estructuras de conexión y mantenimiento.** Estructuras subterráneas construidas hasta el nivel del suelo o pavimento, donde se coloca una tapa. Su forma debe ser cilíndrica en la parte inferior y tronco cónico en la parte superior; además, son lo suficientemente amplias para que un hombre baje por ellas y realice el mantenimiento o inspección de los conductos.

Las estructuras de conexión y mantenimiento son:

- **Pozos (de mampostería y estructurales).**
- **Cajas de visitas.**

Fig. 11. Detalle de pozo de visita de mampostería.



Fuente: Tesis Rediseño del sistema de alcantarillado sanitario, alcantarillado pluvial y propuesta de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Armenia, Autores Ginelly V. López y Francisco A. Rodríguez, UES, El Salvador, 2012, pág. 18.

Los pozos de visita para aguas lluvias podrán ser de ladrillo de barro repellados o de piedra, cuando la altura no exceda de 6.00 metros. Cuando su altura sea mayor o el caso de tener caídas iguales o mayores de 3.00 metros estos deberán ser reforzados adecuadamente debiendo presentar en los planos respectivos, los detalles y cálculos estructurales⁸.

d) **Estructuras de descarga:** Obra final del sistema de alcantarillado. Asegura descarga continua a una corriente receptora. Pueden ser de dos tipos:

⁸ Reglamento de la Ley de Urbanismo y Construcción en lo Relativo a Parcelaciones y Urbanizaciones habitacionales, Artículo 92.

- **Descarga a conducto cerrado:** Cuando la conducción por el emisor de una red de alcantarillado es entubada y se requiere verter las aguas a una corriente receptora que posea cierta velocidad y dirección, se utiliza una estructura que encauce la descarga directa a la corriente receptora y proteja al emisor de deslaves y taponamientos. Este tipo de estructuras de descarga se construyen con mampostería o concreto, y su trazo puede ser normal a la corriente o esviado.
- **Descarga en canal a cielo abierto:** En este caso, la estructura de descarga consiste en un canal a cielo abierto hecho con base de mampostería, cuyo ancho se incrementa gradualmente hasta la corriente receptora. De esta forma se evita la socavación del terreno natural y se permite que la velocidad disminuya.

Además, en ocasiones las descargas pueden provocar problemas de erosión, derrumbes de terraplenes y socavamiento de las bases de los mismos, etc. Esto se da porque muchas veces no se realizan las obras de protección necesarias en la descarga de las aguas lluvias de las localidades.

Es por esto que se hace necesario ejecutar obras adicionales en los puntos de descarga; la función principal de dichas obras es proteger a los terrenos vecinos, así como también a los que se encuentran aguas abajo.

Entre las principales obras de protección se tienen:

- **Los Muros Guarda Niveles.**
 - **Los Disipadores de Energía.**
 - **Los Cabezales.**
- e) **Sistemas de Control de Escorrentía o Sistemas de Detención o Retención:** Son las infraestructuras hidráulicas que se diseñan para detener temporalmente aguas lluvias y descargar en forma controlada a un colector pluvial o un cuerpo receptor el excedente del volumen de escorrentía generada por una tormenta en un área determinada, que resulta de la

modificación y/o alteración de las condiciones del suelo y que trae como consecuencia una disminución en su capacidad de infiltración y/o cambios en las características hidráulicas del drenaje natural, como el aumento de caudales pico⁹.

f) **Instalaciones complementarias:** Son estructuras que no siempre forman parte de una red, pero que permiten un funcionamiento adecuado de la misma. Dentro de ellos están:

- **Plantas de bombeo**
- **Vertederos**
- **Sifones invertidos**
- **Cruces elevados**

Además, en ocasiones las descargas pueden provocar problemas de erosión, derrumbes de terraplenes y socavamiento de las bases de los mismos, etc. Esto se da porque muchas veces no se realizan las obras de protección necesarias en la descarga de las aguas lluvias de las localidades.

Es por esto que se hace necesario ejecutar obras adicionales en los puntos de descarga; la función principal de dichas obras es proteger a los terrenos vecinos, así como también a los que se encuentran aguas abajo.

Entre las principales obras de protección se tienen:

- **Los Muros Guarda Niveles.**
- **Los Disipadores de Energía.**
- **Los Cabezales.**

2.3.3. Condición de la Red de alcantarillado pluvial del AMSS.

La red de drenaje de aguas lluvias del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) adolece de una serie de problemas originados, sobre todo por la carencia

⁹ Reglamento de la Ley de Urbanismo y Construcción en lo Relativo a Parcelaciones y Urbanizaciones habitacionales.

de una institución legalmente responsable de la planificación, limpieza y mantenimiento del sistema. El sistema de drenaje del AMSS casi en su totalidad está construido con colectores de concreto de sección circular.

El Ministerio de Obras Públicas (*MOP*), tradicionalmente tuvo a su cargo el mantenimiento parcial de este sistema, como parte del mantenimiento de la red vial; pero a partir del año 2000 comenzó el proceso mediante el cual se ha ido desligando de esta responsabilidad. A partir de 1999 la Oficina del Área Metropolitana de San Salvador (*OPAMSS*) retomó la responsabilidad de otorgar el trámite de factibilidades de aguas lluvias, estando ligado esto directamente al otorgamiento de los permisos de desarrollos urbanos en el ámbito metropolitano.

Algunos problemas identificados en la red de drenaje son los siguientes: graves deficiencias estructurales, poca capacidad hidráulica, conexiones cruzadas de aguas negras y vertidos industriales, diseños inadecuados, cambios de diámetros mayores a diámetros menores, pozos sellados por el pavimento.

Todo esto es el resultado de una falta de planificación del sistema y de la falta de normativa adecuada para su construcción, además, hay que agregar la expansión descontrolada de desarrollos urbanos que impermeabilizan cada vez más nuestras áreas, incrementándose así el volumen de aguas, lo que viene a sobrecargar las capacidades de los sistemas colectores existentes.

a) Deficiencias estructurales.

Los colectores de aguas lluvias se encuentran sometidos a cargas verticales (peso del suelo más cargas vivas -tráfico-) y cargas horizontales (empuje activo o pasivo del terreno). La combinación de estas cargas causa la ovalización del colector o la pérdida de la forma del colector respecto a la forma original.

También hay muchos casos de colectores que han sido instalados con pendientes mayores que las de diseño, específicamente los colectores de

concreto, lo que provoca el deterioro rápido de la parte inferior de la tubería, debido al desgaste ocasionado por la fricción del agua.

Entre algunos factores que contribuyen al deterioro estructural de los sistemas deben mencionarse: los movimientos sísmicos frecuentes en nuestro país; instalación inadecuada de los sistemas, carentes de una supervisión y normativa adecuada, falta de limpieza y mantenimiento.

Vale la pena mencionar algunos tipos de fallas estructuras encontradas, tales como: fisuras y grietas que atraviesan la totalidad del material de la tubería; roturas en la tubería, que son evidentes desde la reducción de la sección de estas hasta el colapso total; deformaciones en la tubería; fallas superficiales causadas algunas veces por la corrosión del material del tubo o por el desprendimiento de arena y de grava de la tubería; desplazamiento transversal y longitudinal de las tuberías, visibles cuando las uniones entre tubos están desplazadas o parcialmente abiertas; conexiones empotradas, muy usuales debido a las conexiones cruzadas existentes en nuestro medio, las que aparte de contaminar aún más las aguas lluvias, debilitan estructuralmente los sistemas al ser empotradas directamente a estos; arrastre de objetos extraños en el sistema, como fragmentos de hormigón, que además de causar obstrucciones también impactan la tubería causando así daños y debilidad estructural; incrustaciones de raíces, las cuales van deteriorando progresivamente tanto el área hidráulica del tubo como su condición estructural; acumulaciones de grasa y basura, que van formando costras en el interior de los tubos, disminuyendo así su área hidráulica.

b) Poca capacidad hidráulica.

Es importante mencionar que los sistemas de drenaje pluvial del AMSS ya no cuentan, en su mayoría, con capacidad hidráulica, debido a que han sido sistemas construidos como redes aisladas y hay pocos colectores primarios de grandes dimensiones para manejar el caudal total. Todo esto siempre redundará en la falta de planificación desde los inicios de nuestras ciudades;

estos sistemas se diseñaron para manejar áreas de influencia pequeñas y nunca considerando el aporte de los desarrollos futuros. Un ejemplo de esto es la colonia Escalón, que en ningún momento contó con los permisos respectivos para desarrollarse.

Otro factor importante por mencionar es que contamos con dos estaciones climáticas bien definidas, la estación lluviosa y la estación seca, cuya duración promedio es de cinco a seis meses. La época seca permite la acumulación de basura, de ripio y de toda clase de desecho. La época lluviosa, con precipitaciones de mucha intensidad, facilita el arrastre de desechos sólidos, y que van a dar hasta los colectores pluviales.

Vale la pena mencionar la importancia de contar con un registro adecuado de precipitaciones, ya que durante muchos años no hubo registros confiables. En la actualidad se cuenta con los datos de lluvia colectados por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (*SNET*) que ahora es DGOA del MARN.

c) Conexiones cruzadas de aguas negras y de vertidos industriales.

Las conexiones cruzadas en los sistemas de aguas pluviales son un problema permanente en toda la red de aguas lluvias, esto deteriora los colectores y a la vez contamina la escorrentía pluvial, y esto en general disminuye el área hidráulica instalada de los sistemas.

En cuanto a los vertidos industriales debe señalarse que en el sistema pluvial del *AMSS* es muy común contar con este tipo de descargas, que en muchos casos contienen desechos tóxicos muy contaminantes que terminan por deteriorar las paredes de los sistemas colectores.

d) Diseños inadecuados y cambios de diámetros mayores a diámetros menores.

La red de aguas lluvias del *AMSS* no responde a un diseño adecuado, sino que responde a diseños aislados, de ahí que entre un sistema y otro puede haber conexiones de diámetros mayores a diámetros menores. En la práctica

hidráulica esto resulta inadecuada, ya que se producen almacenamientos de agua que provocan problemas puntuales de inundación.

e) Pozos sellados por el pavimento.

Una función muy importante de los pozos es la inspección y mantenimiento de la red; a través de estos se da la incorporación de escorrentías adicionales al sistema (unión de varias tuberías), razón por la que es importante contar con una distribución adecuada de pozos en un sistema de drenaje. No obstante, en la red del AMSS es muy común notar que aparte de no contar con un número adecuado de pozos de visita, incide otro factor determinante que es el sellado de las tapaderas de estos con el recarpeteo de las calles efectuado por el MOP, sin tomar en cuenta la importancia de este tipo de infraestructura, volviéndose esta causa principal de la inaccesibilidad al sistema.

2.3.4. Normativas y Leyes para drenajes convencionales en El Salvador

En la actualidad no hay ninguna institución que se responsabilice totalmente por el mantenimiento de la red de aguas lluvias de San Salvador.

A partir de la firma del Convenio suscrito entre el Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (VMVDU) y la OPAMSS, de fecha 08 de abril de 1999, el cual está referido a trasladar la atribución para la extensión de resoluciones de Factibilidad de Drenaje de Aguas Lluvias para los proyectos localizados dentro del AMSS.

Hasta el año 2000, la Dirección de Urbanismo y Arquitectura (DUA), dependencia del Ministerio de Obras Públicas (MOP) asumió esa función, ya que se encargaba de planificar, ejecutar nuevos proyectos y dar mantenimiento a la red de drenaje pluvial, la cual contaba con su propio archivo, sin embargo, al desaparecer dicha institución, la responsabilidad no fue asumida por ninguna dependencia del

Estado o gobierno municipal. A partir de un convenio, el Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (VMVDU) traspasó la responsabilidad de dar factibilidades de drenaje a OPAMSS, sin que esta institución se responsabilizara por el mantenimiento de la red, lo que actualmente implica que: «el tema del drenaje en El Salvador está huérfano».

En la actualidad, cuando existe algún problema de drenaje de aguas lluvias, la comunidad afectada en conjunto con la alcaldía correspondiente, y la empresa responsable del inconveniente (en caso lo amerite), serán los encargados de solucionarlo, conllevando en la mayoría de los casos una medida puntual.

El Plan Maestro de Drenaje de Aguas Lluvias del AMSS, financiado por la Agencia Sueca de Desarrollo Internacional (ASDI) y OPAMSS, realizó una revisión sobre el marco institucional con relación a aguas lluvias, el cual notificó la inexistencia de alguna ley que responsabilice a alguna institución para el manejo de las aguas lluvias. La ley de Carreteras y Caminos proporciona algunas pautas respecto a las responsabilidades para la construcción de carreteras y las obras correspondientes de drenaje de aguas lluvias. Sin embargo, la conservación de estas carreteras y sus drenajes, y la responsabilidad de ejecutar obras públicas en la red de aguas lluvias permanece en un vacío legal e institucional, y aún existe la falta de acuerdos generales y de prácticas establecidas relacionadas a la división de responsabilidades. En la actualidad, existe una clara indicación de la tendencia a la descentralización de la responsabilidad de ejecutar obras públicas dentro de los límites urbanos. Sin embargo, el financiamiento permanece como un obstáculo importante para alcanzar un acuerdo, ya que no existen mecanismos establecidos para la inversión en drenajes de aguas lluvias.

Sobre la base de lo antes expuesto, puede concluirse que a la fecha no existe, ni la institución responsable del sistema de drenaje ni el marco institucional que permita el financiamiento necesario para ejecutar nuevas obras o para dar

mantenimiento a las obras ejecutadas. La experiencia del AMSS pone en evidencia los problemas que se generan a raíz de la ausencia de un marco regulatorio: por ejemplo, los nuevos desarrollos podrán ejecutar nuevas infraestructuras, pero para conectar sus sistemas de drenaje deberán realizar cambios en la infraestructura existente, lo cual implica costos mayores a lo que representa su proyecto.

Ante esta situación, evidentemente se han buscado alternativas para aminorar esta problemática, sin embargo, las mismas no constituyen una solución integral, por tanto es urgente que tanto los gobiernos municipales y el Gobierno Central aborden con responsabilidad este tema, ya que de lo contrario, la factura por los costos generados en pérdidas por inundaciones o hundimientos será cada vez mayor, y puede, en el peor de los casos, causar mayores pérdidas humanas de las que a la fecha se han tenido. En El Salvador se acostumbra a la reacción y no a la prevención en caso de inundaciones; si existiera prevención habría un consenso entre las diferentes instituciones, cuyos principales actores serían el Gobierno Central, a través del MOP VMVDU, y los gobiernos municipales. La primera institución no realiza las acciones pertinentes para solucionar la situación, mandando a OPAMSS denuncias de problemas de urbanizaciones para que sean resueltas, las cuales quedan sin solventar ya que esta última institución no tiene la potestad legal para hacerlo. Por otro lado, las alcaldías no tienen la capacidad técnica ni económica para desarrollar soluciones globales, que son las que podrían prevenir inundaciones en un futuro.

Esta crisis se agudizó a partir de la desaparición de la DUA. En nuestro país quien se encarga de regular los proyectos de alcantarillado pluvial es el Vice Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (VMVDU).

Ley de Urbanismo y Construcción.

Obras de Urbanización para Aguas Lluvias.

Art. 91.- Los proyectos de parcelación que tengan áreas de influencia que converjan a ellos o que sean atravesados por quebrada o río; deberán contar con un estudio hidrológico de la cuenca en que se encuentren ubicados, a fin de considerar el desarrollo de otros proyectos tanto aguas arriba como aguas abajo. Si el sector en donde se encuentra ubicado el proyecto es de pendientes fuertes, deberá prevenirse la erosión hacia adentro o hacia fuera con los terrenos que los circundan, para lo cual será necesario proyectar las obras de protección y canalización necesarias. También deberán contar un diseño hidráulico de las tuberías y otras obras de drenaje internas del proyecto. El sistema de drenaje de aguas lluvias de toda parcelación será calculado por el urbanizador para intensidades de lluvia que ocurran con una frecuencia de una vez cada cinco años (Período de Retorno), tomando en consideración las características especiales del sector en donde se encuentre ubicada. Para aquellas obras de drenaje cuyo diámetro exceda de 72 pulgadas, su diseño será con Períodos de Retorno de diez o veinticinco años, según el caso. El escurrimiento superficial máximo permisible en cordones y cunetas o canaletas será de cien metros. Casos especiales serán analizados por el VMVDU. En toda vía de circulación menor, las tuberías de aguas lluvias se instalarán al centro de las mismas. En vías vehiculares el diámetro mínimo de conexión de tragantes a pozo de visita será de 15 pulgadas a partir del segundo tragante. En acceso rodado únicamente cuya longitud total máxima sea de 75.00 metros, el diámetro mínimo de conexión de tragantes a pozo de visita será de 15 pulgadas a partir del segundo tragante. El diámetro mínimo para tuberías de aguas lluvias sobre una vía vehicular será de 18 pulgadas.

En Accesos Peatonales únicamente, se podrán utilizar canaletas rectangulares o medias cañas de concreto en sustitución de cordones y cunetas. El diámetro mínimo de conexión de tragante a caja de registro o pozo de visita será de 12 pulgadas y de dos tragantes a caja o pozo, será de 15 pulgadas a partir del

segundo tragante. El diámetro mínimo sobre pasaje peatonal será de 15 pulgadas.

La distancia permisible entre la parte superior de las tuberías de agua lluvias y la rasante de las vías que será de 1.50 metros, con la finalidad de evitar interferencias con las tuberías de otros sistemas; pero en caso de no existir dichas interferencias, la distancia en mención podrá reducirse como máximo a 1.00 metro casos especiales serán analizados por el VMVDU. En todo cambio de dirección o pendiente de tuberías para aguas lluvias, se deberá construir un pozo de visita o una caja de registro. Las cajas de registro se permitirán únicamente en Accesos Peatonales en sustitución de pozos de visita y para tuberías con un diámetro máximo de 24 pulgadas. Los pozos de visita y las cajas de registro deberán contar con su correspondiente tapadera de inspección. No se permitirán pozos de visita sin cajas de registro ciegos.

Si el cambio de dirección de las tuberías es de 45 grados o más con respecto a su eje, el pozo de visita deberá contar con una caída de 30 centímetros como mínimo, para tuberías con un diámetro máximo de 30 pulgadas; y para tuberías de 36 a 72 pulgadas de diámetro, la caída deberá ser de 1.00 metro como mínimo. Casos especiales serán analizados por el VMVDU. Para cambios de dirección en tuberías cuyo diámetro sea igual o mayor de 36 pulgadas, deberá diseñarse en el pozo de visita una pared de concreto armado o un muro de choque frente a la llegada de las aguas. La entrega de aguas pluviales a un colector (quebrada o no), deberá tomar en cuenta el nivel máximo probable de las avenidas de este último, a fin de no obstaculizar la incorporación de las aguas.

Si cae a un río o quebrada, su salida debe de estar en dirección del flujo de las aguas con ángulo de 45 grados y no más de 1.00 metro de altura para disminuir el golpe de ángulo de agua al caer. Esta altura podrá ser mayor si se proyecta en el lecho de la quebrada o río, un emplantillado de mampostería de piedra y/o

concreto. La pendiente mínima en tuberías de aguas lluvias será del 0.5% y la máxima será la que le corresponda a cada tubería según el cuadro 11.

La pendiente mínima y máxima permisible en bóveda será determinada en el diseño, pero en todo caso la velocidad mínima de la corriente no podrá ser inferior a 1 m/seg.

Su piso deberá ser de mampostería de piedra con un recubrimiento de concreto simple, de concreto o armado o la combinación de ambos.

Los cambios de dirección menores de 45 grados con respecto a su eje en bóveda podrán suavizarse dándole una forma circular en una longitud de desarrollo adecuada.

Cuadro 11. Pendiente máxima permitida para colectores de aguas lluvias según diámetro.

Diámetro de tubería (pulgadas)	Pendiente máxima permisible (%)
12	6.5
15	5.8
18	5.0
24	3.0
30	2.5
36	2.0
42	2.0
48	2.0
60	1.5
72	1.0

Si el cambio de dirección de las bóvedas es de 45 grados o más con respecto a su eje, deberá diseñarse según el caso, una caja especial en sustitución del pozo de visita, la cual deberá contar con una estructura de choque en la dirección de las aguas y con elementos adicionales en su piso para disipar la energía de la corriente.

En todo caso, las bóvedas no deberán contar con caídas interiores en su recorrido, en su defecto deberán diseñar rampas (rápidos) con una longitud de desarrollo adecuada y con elementos adicionales en su piso para disipar la energía de la corriente. En los puntos de descarga de tuberías y bóvedas a

quebradas o ríos, deberán proyectarse cabezales con gradas disipadoras de energía o rampas (rápidos) con una longitud de desarrollo adecuada y con elementos adicionales en su piso.

Pozos de Visita para Aguas Lluvias.

Art. 92.- los pozos de visita para aguas lluvias podrán ser de ladrillo de barro repellados o de piedra, cuando su altura no exceda de 6.00 metros. Cuando su altura sea mayor o en el caso de tener caídas iguales o mayores de 3.00 metros éstos deberán ser reforzados adecuadamente debiendo presentar en los planos respectivos, los detalles y cálculos estructurales.

La distancia máxima entre pozos de visita será de cien metros (100.00 metros), con una variación permisible del 15% en casos especiales.

Las tapaderas de los pozos serán de hierro fundido en las vías de circulación vehicular, pudiendo ser de concreto armado en los Pasajes Peatonales.

Tragantes.

Art. 93.- En todas las Vías de Circulación Menor serán de ladrillo de barro. Las parrillas de éstos serán de hierro fundido en las vías de circulación vehicular, pudiendo hacerse de concreto armado o de estructura metálica en los Accesos Peatonales.

En las vías de distribución y de Reparto, no se permitirán los tragantes remetidos. La distancia máxima entre tragantes será de cien metros (100.00 mts). Casos especiales serán analizados por el VMVDU.

Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de AMSS

Art. V. 64 Tragantes

En todas las Vías de Circulación Menor serán de ladrillo de barro. Las parrillas de éstos serán de hierro fundido en las vías de circulación vehicular, pudiendo hacerse de concreto armado o de estructura metálica en los Pasajes Peatonales.

En las vías de circulación vehicular, se permitirán únicamente los tragantes con

parrilla de hierro fundido. La distancia máxima entre tragantes será de cien metros (100.00 Mts). Casos especiales serán analizados por la OPAMSS. Ver detalle de tragantes en Figura 12

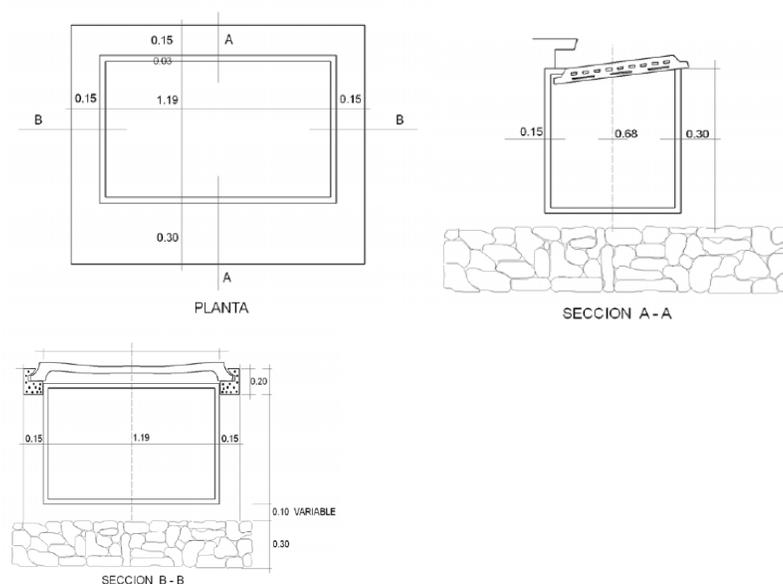


Figura 12. Detalle de pozo de tragante con parrilla de hierro fundido.

2.4 Sostenibilidad.

2.4.1. Informe Brundtland: “Nuestro objetivo común”

Desde los años 70, ha habido una preocupación creciente acerca de los cambios rápidos e inusuales en el clima mundial. Dicha preocupación se inició entre los científicos, pero más recientemente se ha convertido en un tema de importancia global que es discutido entre muchas personas diferentes, desde agricultores a nivel local, hasta los gobiernos nacionales en el ámbito internacional.

Debido al Cambio Climático, los patrones del clima se están volviendo más erráticos. El aumento en la temperatura a nivel global está redundando en patrones de lluvia menos predecibles, en sequías más frecuentes, olas de calor más fuertes, y amenazas climáticas más intensas, tales como las inundaciones y los ciclones (tifones/huracanes). Estos cambios ya están teniendo un impacto

devastador sobre las vidas de las personas en muchas partes del mundo, particularmente en los países más pobres.

El origen del concepto de Desarrollo sostenible está asociado a la preocupación existente y creciente en la comunidad internacional en las últimas décadas del siglo XX al considerar el vínculo entre el desarrollo económico y social y sus efectos más o menos inmediatos sobre el medio natural. Esto, como se expondrá más adelante, no se trataba de un conflicto nuevo; lo nuevo es la magnitud y extensión alcanzada por el mismo, que condujo a una valoración sobre sus consecuencias futuras, incluida dentro de ellas la capacidad de supervivencia de la especie humana.

La toma de conciencia a nivel mundial de la estrecha relación existente entre el desarrollo económico y el medio ambiente, tuvo su expresión en el marco de las Naciones Unidas con la creación por este organismo en el año 1983 de la Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente, integrada por un grupo de personalidades del ámbito científico, político y social, representativo de los diversos intereses existentes en la comunidad internacional. Para dirigir esta Comisión fue designada la señora Gró Harlem Brundtland, en aquel entonces primer Ministro de Noruega, quien tenía un papel destacado por sus criterios e intervenciones en los temas ambientales. La Comisión recibió el mandato de elaborar un informe que diera respuesta a las siguientes inquietudes:

- Analizar los temas vinculados al desarrollo y el medio ambiente y formular propuestas al respecto.
- Proponer nuevas formas de cooperación internacional capaces de influir en los temas de desarrollo y medio ambiente para alcanzar los objetivos propuestos
- Promover niveles de comprensión y compromiso con estos objetivos por parte de individuos, organizaciones, empresas, institutos y gobiernos.

En abril del año 1987 la Comisión publicó y dio a conocer su informe, titulado “Nuestro futuro común” (“Our common future”, en idioma inglés) conocido también como “Informe Brundtland” (Brundtland, G.H., 1987) en el cuál se introduce el concepto de Desarrollo sostenible, definido en estos términos:

“Está en manos de la humanidad asegurar que el desarrollo sea sostenible, es decir, asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias”.

2.4.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible del Milenio (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, también conocidos como Objetivos Mundiales, se adoptaron por todos los Estados Miembros en el año 2015 como un llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para 2030.

Los 17 ODS están integrados, ya que reconocen que las intervenciones en un área afectarán los resultados de otras y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad medio ambiental, económica y social.

Todo el mundo es necesario para alcanzar estos objetivos ambiciosos. Se necesita la creatividad, el conocimiento, la tecnología y los recursos financieros de toda la sociedad para conseguir los ODS en cada contexto.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son:

1. Erradicar la pobreza en todas sus formas en todo el mundo.
2. Poner fin al hambre, conseguir la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, y promover la agricultura sostenible.
3. Garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todos y todas en todas las edades.

4. Garantizar una educación de calidad inclusiva y equitativa, y promover las oportunidades de aprendizaje permanente para todos.
5. Alcanzar la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y niñas.
6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.
7. Asegurar el acceso a energías asequibles, fiables, sostenibles y modernas para todos.
8. Fomentar el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos.
9. Desarrollar infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.
10. Reducir las desigualdades entre países y dentro de ellos.
11. Conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
12. Garantizar las pautas de consumo y de producción sostenibles.
13. Tomar medidas urgentes para combatir el Cambio climático y sus efectos.
14. Conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, mares y recursos marinos para lograr el Desarrollo sostenible.
15. Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación y detener y revertir la degradación de la tierra, y frenar la pérdida de diversidad biológica.
16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el Desarrollo sostenible, facilitar acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles.
17. Fortalecer los medios de ejecución y reavivar la alianza mundial para el Desarrollo sostenible.

2.4.3. Ciudades y comunidades sostenibles.

Más de la mitad de la población mundial vive hoy en zonas urbanas. En 2050, esa cifra habrá aumentado a 6.500 millones de personas, dos tercios de la humanidad. No es posible lograr un Desarrollo sostenible sin transformar radicalmente la forma en que construimos y administramos los espacios urbanos.

El rápido crecimiento de las urbes en el mundo en desarrollo -como resultado de la creciente población y del incremento en la migración- ha provocado un incremento explosivo de las mega urbes, especialmente en el mundo desarrollado, y los barrios marginales se están convirtiendo en una característica más significativa de la vida urbana.

Mejorar la seguridad y la sostenibilidad de las ciudades implica garantizar el acceso a viviendas seguras y asequibles y el mejoramiento de los asentamientos marginales. También incluye realizar inversiones en transporte público, crear áreas públicas verdes y mejorar la planificación y gestión urbana de manera que sea participativa e inclusiva.

2.4.4. Desafíos para la sostenibilidad del drenaje en el siglo XXI.

Cambio climático.

Las principales transformaciones que produce el cambio climático sobre el ciclo del agua son:

- Cambios de tasas de evaporación y de humedad en el aire.
- Aumento en la frecuencia, magnitud e intensidad de las tormentas.
- Eventos pluviométricos más largos.
- Períodos prolongados de sequía.
- Aumento de temperatura

- Disminución de precipitación anual
- Aumento de precipitación extrema

Los cambios en la pluviometría pueden afectar gravemente al rendimiento de las redes de drenaje, que tienen que trabajar con caudales para los que no fueron diseñados, lo cual puede hacerlas no operativas e incluso reducir su vida útil y dañarlas; además, también se afecta negativamente a la dinámica natural de los ecosistemas y de las cuencas; motivos por los que se hace necesario un cambio de estrategia en la gestión, que hasta ahora se estaba dando en lo relativo a las aguas pluviales.

Que se tengan en cuenta, no sólo los efectos de las variaciones hidrometeorológicas, sino también otros derivados del Cambio climático que afectan a la salud e integridad de las personas.

Vulnerabilidades en el AMSS.

Las principales vulnerabilidades definidas en el AMSS, a consecuencia del Cambio climático son:

- **Alta densidad urbana**

El Salvador es el segundo país del continente americano con mayor densidad demográfica, aproximadamente 305 habitantes por kilómetro cuadrado. Aunque actualmente la tasa de crecimiento es baja en su globalidad, del 0.4%, en las ciudades este valor es un punto más alto, ya que existe migración del campo a las áreas urbanas. El Área Metropolitana de San Salvador, con más de dos millones de habitantes (aproximadamente el 30% del total), es donde mayor concentración poblacional hay. El sistema de aguas lluvias, que data de hace más de 50 años, presenta problemas de incapacidad en muchos de sus tramos. Por ello requiere de un sistema de drenaje capaz de realizar un correcto servicio para los actuales y futuros habitantes (la natalidad ha descendido, pero se espera

el retorno de parte de los emigrantes), para lo que será necesario incorporar nuevos elementos que optimicen el sistema existente de alcantarillado.

- **Urbanismo: impermeabilización del suelo**

Las consecuencias directas de la impermeabilización del suelo sobre el ciclo hidrológico son:

- Reducción en la infiltración, lo que influye directamente en la recarga de acuíferos. disminuyéndola disponibilidad del recurso agua.
- Aumento en el volumen de escorrentía y en los caudales punta, que causa erosiones y modificaciones en la hidromorfología de los cauces.
- Empeoramiento de la calidad de la escorrentía, que contamina las masas de agua naturales.
- Reducción del tiempo que permanece el agua precipitada en la superficie, se limita la evapotranspiración lo que provoca el calentamiento de la masa de aire en contacto con la superficie urbana (el denominado efecto “isla de calor”)

Para afrontar el reto de la expansión urbana, se requiere de instrumentos de ordenación urbana, como la guía HAUS¹⁰ elaborada por la OPAMSS, en octubre de 2021, en la que se contemplan las infraestructuras de drenaje como una parte necesaria e inseparable del crecimiento urbano y se proponen actuaciones para contrarrestar los efectos de la impermeabilización en futuras edificaciones

- **Envejecimiento y deterioro de las infraestructuras**

El envejecimiento de las redes de drenaje secundario es una de las problemáticas más importantes en lo relativo a la gestión de pluviales en el AMSS. Gran parte

¹⁰ HAUS-Guía Hábitats Urbanos Sostenibles del AMSS (OPAMSS, 2021).

de la red de alcantarillado tiene más de cincuenta años y apenas si se han realizado tareas de mantenimiento. Esto ha provocado que la capacidad de los colectores que evacuan la escorrentía esté muy reducida (llegando a haber secciones completamente taponadas) a consecuencia de la corrosión de canales y tuberías de transporte, la deposición en ellos de sedimentos o la mayor carga a la que están sometidos por el crecimiento urbano. Con los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, se reduce la carga de contaminantes que pueden entrar a la red, así como los caudales pico que producen erosiones, por lo que son una herramienta “verde” para afrontar este reto.

- **Degradación de la calidad de las masas de agua naturales**

Las quebradas del AMSS presentan en su generalidad una pérdida de la calidad del agua circulante, ya que los actuales sistemas de drenaje urbano las vierte directamente la escorrentía, tras lavar las basuras depositadas sobre la superficie, que van a las quebradas, contaminándolas, y a los lagos o ríos donde desembocan.

Además de las consecuencias ambientales negativas sobre los ecosistemas, la degradación de calidad del agua limita la cantidad de recurso disponible para consumo humano. Por poner un ejemplo, todo el proceso de degradación del río Matalapa, en la cabecera del río Acelhuate, está íntimamente relacionado con los procesos de urbanización del municipio de San Marcos.

Para conseguir una calidad apta, se requiere de una visión holística del drenaje urbano que contemple sus efectos sobre el medio, minimizando los negativos y potenciando posibles beneficios que el mismo drenaje puede aportar.

2.5 Generalidades de los SUDS.

2.5.1. Drenaje Sustentable.

El drenaje de aguas pluviales está asociado con la forma en que las ciudades se han ido conformando, está también asociado a procesos sociales y económicos

que han coadyuvado a generar un proceso de urbanización expulsivo y por ende han generado asentamientos de poblaciones en las periferias, donde se carece de infraestructura de saneamiento o existen soluciones no adecuadas. La impermeabilización sin planificación hace que el agua escurra rápidamente por las calles e impacte, muchas veces, en la calidad de vida de estos sectores de la población, en general los más necesitados.

En el AMSS el mal funcionamiento del drenaje pluvial provoca problemas cotidianos que afectan la calidad de vida de los ciudadanos al generar inundaciones de viviendas, cortes de calles, deterioro de las infraestructuras e importantes pérdidas económicas.

Los principales problemas de drenaje están asociados a: cañadas por predios privados, mal mantenimiento de cunetas, conducciones tapadas por residuos sólidos, erosión de zonas costeras, conexiones clandestinas pluviales, al saneamiento y las descargas de aguas servidas en conducciones hidráulicas superficiales de aguas pluviales.

Las iniciativas con las que se afrontan estos problemas dependen de la conceptualización que se haga del drenaje urbano. Esta conceptualización ha cambiado con el tiempo, por lo que las soluciones que se adoptan también lo hacen.

Analizando la evolución del drenaje urbano de pluviales (entendido como drenaje secundario o micro drenaje), es fácil entender la propagación a nivel mundial de un nuevo tipo de técnicas capaces de afrontar los nuevos retos de las ciudades del siglo XXI, con los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se pueden definir como elementos integradores del paisaje y la hidráulica urbana, cuya misión es capturar, filtrar, retener, transportar, almacenar e infiltrar parte de la escorrentía urbana, tratando de reproducir el ciclo natural del agua de la forma más fiel

posible. Con esto se consigue reducir el caudal de escorrentía urbana además de la carga de contaminantes arrastrada.

En los procesos de urbanización, las cuencas sufren una gran transformación. Al cambiar la permeabilidad del suelo, se aumenta la cantidad de escorrentía y se modifica el ciclo hidrológico. Los SUDS procuran imitar el ciclo hidrológico natural previo a la urbanización o actuación humana, para atenuar el impacto que conlleva el desarrollo urbanístico (mayores caudales de escorrentía y más contaminados) y proveer de espacios paisajísticos con valor social y ambiental.

2.5.2. Experiencias internacionales y maneras de ver el Drenaje Sustentable

Esta nueva forma de entender el drenaje está extendida a lo largo del globo, por lo que, los SUDS han adquirido diferentes nombres dependiendo de la procedencia de la bibliografía que se consulte:

– Sustainable urban Drainage Systems (SuDS). Reino Unido

En el Reino Unido, la asociación CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) define los Sustainable urban Drainage Systems (SuDS), como “aquellos sistemas de drenaje que contribuyen al desarrollo sostenible y a la mejora del diseño urbano, equilibrando los diferentes intereses que influyen en el desarrollo de la comunidad. Enfocan la gestión del agua superficial considerando la cantidad de agua (inundaciones), la calidad (contaminación) y el uso público que se le puede dar a esa agua superficial.” Los SUDS imitan la naturaleza y gestionan la precipitación cerca de donde cae. Pueden ser diseñados para atenuar el caudal pluvial antes de que se incorpore a corrientes, ríos u otras masas de agua. Proporcionan espacios para el almacenamiento de agua en entornos naturales, en donde ésta puede ser infiltrada a través del suelo, evaporada desde la superficie desde la lámina del agua o evapotranspirada por la vegetación.

– **Best Management Practice (BMP). USA y Canadá**

La Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA), publicó en 1993 una guía para el desarrollo de BMP titulada: "Guidance Manual for Developing Best Management Practices (BMP)" donde se explica que las Mejores Prácticas de Gestión son intrínsecamente prácticas para la prevención de la contaminación.

Tradicionalmente, las BMPs se habían enfocado como unas adecuadas medidas de limpieza y unas rigurosas técnicas destinadas a evitar el contacto entre los contaminantes y el agua que podría producirse como consecuencia de escapes, vertidos, o la incorrecta disposición de basuras. Pero actualmente se considera que las BMPs pueden incluir cualquier medida que prevenga la contaminación, como cambios operacionales en la producción que limiten la emisión de contaminantes, optimización de dicha producción, sustitución de materiales, el control de los tratamientos que sean necesarios, etc.

– **Low Impact Development (LID). USA**

Según la EPA, los Low Impact Development (LID) o tácticas de Desarrollo de Bajo Impacto, son: estrategias de diseño que tienen el objetivo de mantener o reproducir el régimen hidrológico previo al desarrollo urbanístico, mediante técnicas de diseño que crean un paisaje hidrológico equivalente al natural. Es decir, técnicas que contemplan las funciones hidrológicas de recarga del agua subterránea, la infiltración y almacenamiento, así como el control del volumen y la frecuencia de las descargas a través de la retención y detención de aguas pluviales distribuida a una micro escala integrada, la reducción de las superficies impermeables y el alargamiento de las trayectorias del flujo y el tiempo de escorrentía.

– **Green infrastructure. USA**

El término Green infrastructure o Infraestructura Verde es relativamente nuevo y se le pueden dar varias acepciones. La EPA propone el siguiente significado:

“Sistemas y prácticas que emplean o imitan procesos naturales para infiltrar, evapotranspirar, o reutilizar el agua pluvial en donde se genera. La infraestructura verde puede ser usada en una amplia gama de espacios a diferente escala en lugar de los elementos de drenaje convencional (o añadiéndolos a estos elementos), para favorecer los principios del Desarrollo de Bajo Impacto (LID).”

– **Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDUS). España**

En la publicación del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), organismo público de innovación y vanguardia de España, se refiere como, “Gestión de las aguas pluviales. Implicaciones en el diseño de los sistemas de saneamiento y drenaje urbano.” (Puertas Agudo J., Suárez López J., Anta Álvarez J.; 2008) se definen las Técnicas de drenaje Urbano Sostenible (TDUS) como: “Procedimientos destinados a que el sistema global de saneamiento mejore su eficacia en la recogida, transporte y depuración de las aguas pluviales”

– **Water Sensitive Urban Design (WSUD). Australia.**

El Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Australia define el Water Sensitive Urban Design (WSUD) o Diseño Urbano Sensible del ciclo del Agua como:

“Una filosofía que pretende mitigar los impactos ambientales, particularmente de la cantidad y calidad del agua, sobre en cursos fluviales, asociados habitualmente con la urbanización. El WSUD incorpora medidas de manejo holístico que tienen en cuenta la planificación y el diseño urbano, el uso social y ambiental del paisaje urbano y la gestión integrada de las aguas pluviales con su transporte mediante la reducción de los picos de caudal, la protección de los sistemas naturales y de la calidad del agua, y la reutilización de las aguas pluviales para conservación del paisaje”.

– **Otras nomenclaturas**

También hacen referencia al Drenaje Urbano Sostenible, las Técnicas Alternativas de Drenaje (TAD) en Chile y las Mejores Prácticas de Control (MPC) en Hispanoamérica en general.

2.5.3. El Paradigma de la Sustentabilidad.

Todas estas nomenclaturas que engloban a las nuevas técnicas, se basan en el denominado “Paradigma de la Sustentabilidad”. En este paradigma la recuperación de la infiltración y la no transferencia de los impactos hacia aguas abajo son fundamentales.

El Cuadro 12, ilustra la evolución del paradigma en materia de drenaje en los países desarrollados.

Cuadro 12. Evolución del Paradigma de la Sustentabilidad.

País	Ocurrencia	Muertes	Población Afectada	Daños totales (USD)
Colombia	71	2,675	15,301,018	3,579,353,000
Brasil	121	7,404	15,077,504	8,962,254,000
Argentina	48	836	14,102,249	9,998,210,000

Fuente: Gestión de Inundaciones Urbanas, (Carlos E. M. Tucci. 2007)

Las ventajas que presentan los modelos sustentables sobre los correctivos e higienistas se sintetizan en los siguientes conceptos:

- Preservación del estado natural del escurrimiento (respetando los diferentes ecosistemas naturales).
- Mitigación y/o prevención de inundaciones (compensando el aumento del área impermeable y la velocidad de escurrimiento con medidas de infiltración o almacenamiento temporal).
- Abaratamiento de costos de las infraestructuras de drenaje.

- Mejora de la calidad del agua por la reducción del efecto de la contaminación difusa.
- Protección de zonas vulnerables.
- Protección de infraestructura vial.
- Mejora la calidad del diseño urbano.

2.5.4. Objetivos del Drenaje Sustentable.

Bajo estas circunstancias, el objetivo del drenaje ya no es solo evitar las inundaciones en viviendas y calles alejando el agua lo más rápidamente posible; la visión actual del drenaje es integradora, tratando conjuntamente los problemas de cantidad y calidad del agua pluvial, vinculando los problemas de drenaje con los de residuos sólidos que esta transporta; y fundamentalmente la planificación del desarrollo de la ciudad con el desarrollo de las medidas de control del drenaje necesarias para sostener este desarrollo. Un enunciado posible para definir el objetivo del Drenaje Sustentable es: “Mejorar la calidad de vida de los habitantes mediante un manejo sustentable del agua en la ciudad”.

2.5.5. Principios del Drenaje Sustentable.

Esta forma de ver al drenaje urbano tiene principios que le son propios y son en los que se basa la sustentabilidad de los drenajes, de acuerdo con los siguientes términos:

Gestión sustentable: Reducir impacto ambiental del escurrimiento, tendiendo a una gestión sustentable del mismo y considerando en conjunto el impacto que el drenaje tiene en la cantidad y calidad de agua para un cuerpo receptor.

Visión Integral: La vinculación del drenaje con el saneamiento, los residuos sólidos, el medio ambiente en general, la vialidad, y el ordenamiento territorial,

justifican sobradamente la necesidad de articular el Drenaje Urbano con el resto de los subsistemas.

Prevención: Los impactos que el drenaje pluvial puede tener sobre la ciudad pueden ser prevenidos. Para esto la planificación se torna un instrumento fundamental.

Transferencia “0”: El loteamiento de terrenos, la impermeabilización en la cuenca, la realización de obras, entre otros, suelen aumentar la velocidad del escurrimiento y por tanto los caudales transferidos aguas abajo hacia otras zonas urbanizadas o al cuerpo receptor.

Este aumento suele ocasionar desbordes de la infraestructura de conducción, de quebradas o arroyos, erosión de suelos o erosión costera. Este principio trata de priorizar, en la medida de lo posible, las medidas de control que favorecen la infiltración y la retención de caudales pico. Por otro lado, este tipo de soluciones suelen ser más económicas.

Integrar medidas estructurales y no estructurales: Las medidas estructurales pueden y deben ser compatibilizadas con otras no estructurales como las normativas y los planes de mantenimiento y control, entre otros, tendiendo así a la solución más eficiente y sustentable. El control en fuente es una alternativa a priorizar en muchos casos, en particular para grandes emprendimientos.

Cuenca como unidad de planificación, gestión y control: La cuenca hidrográfica se comporta como una unidad; realizar una obra en la cuenca alta sin tener en cuenta el impacto que tendrá aguas abajo no solo no es recomendable, sino que es irresponsable.

Gestión eficiente del mantenimiento y control: La gestión del drenaje no termina con la culminación de una obra. El mantenimiento y el control son aspectos tan importantes como la obra misma.

Participación: La participación ciudadana es un componente fundamental en la Planificación, la Gestión y el Control. Para lograr una participación activa de la población deben establecerse estrategias de educación y comunicación.

2.5.6. Funcionamiento de los SUDS

Los SUDS engloban un conjunto de técnicas o componentes de diferente naturaleza que, si bien funcionan por sí mismas para una gestión más efectiva del agua pluvial, no deben considerarse de forma individual, sino como un conjunto interconectado, diseñado para administrar, tratar y hacer el mejor uso de las aguas superficiales, desde donde cae la lluvia hasta el punto en que se vierte al medio receptor y esto se consigue seleccionando y ordenando los componentes de los SUDS según su desempeño (conviene aclarar que una misma técnica puede tener más de una funcionalidad):

- **Sistemas de recolección de agua de lluvia:** Capturan el agua de lluvia y facilitan su uso dentro de un edificio o el entorno local.
- **Sistemas de superficies permeables:** Permiten que el agua percole al interior del subsuelo, lo que reduce la proporción de escorrentía que se transporta al sistema de drenaje.
- **Sistemas de infiltración:** Facilitan la infiltración de agua en el subsuelo, reduciendo el volumen de escorrentía.
- **Sistemas de transporte:** Conducen el flujo de agua a sistemas de almacenamiento, en muchos casos también eliminan partículas contaminantes.
- **Sistemas de almacenamiento:** Controlan caudales punta y, cuando es posible, también controla volúmenes de escorrentía, laminando las descargas de agua al medio receptor.
- **Sistemas de tratamiento:** Eliminan o facilitan la degradación de contaminantes presentes en la escorrentía.

Los componentes de los SUDS abarcan una amplia gama de tipos: pueden ser superficiales o subterráneos; estar compuestos por vegetación, elementos prefabricados y/o infraestructuras constructivas; administrar y usar el agua de lluvia cerca de donde cae, transportarla y/o almacenarla.

2.5.7. Efectos de los SUDS en las ciudades

Uno de los acontecimientos más notables, a nivel socioeconómico y demográfico que comenzó a mitad del siglo 20 y que aún perdura, es el rápido crecimiento de la población urbana, debido a que son miles las personas que migran anualmente de zonas rurales hacia las ciudades, núcleos económicos y de trabajo.

Con el incremento demográfico, los requerimientos de agua para consumo y actividades económicas se incrementan de manera que el mismo proceso de urbanización puede suponer un problema en aquellas municipalidades que no disponen de medios para abastecer a la nueva población.

Es aquí donde los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) entran en juego para ayudar a las ciudades a poder evitar colapsos e inundaciones y/o abastecerse de parte de los recursos que necesita gracias a sus multifuncionalidades, es decir a su capacidad para aportar diferentes beneficios, no sólo la de prevenir.

Volviendo al proceso de urbanización, otra de sus consecuencias es la desaparición de espacios verdes para el disfrute de la ciudadanía, ya que las personas necesitan vivir en ciudades saludables, ciudades bonitas y habitables. Una propuesta para ello sería enfocar un diseño de ambientes urbanos que promueva la naturaleza como un factor clave, creando espacios cohesivos socialmente y renaturalizados en los que se relacionen las personas con plantas y animales. Espacios más saludables que también incorporan medidas de la lucha contra el cambio climático, las inundaciones, las altas temperaturas, la sequía y la contaminación.

Para ello se puede utilizar positivamente algunos de los componentes que hay en las ciudades (espacios abiertos, como parques, plazas, carriles para bicicletas y vías peatonales; y otros integrantes a menor escala, como techos, parqueos o patios) y promover en ellos los servicios ecosistémicos urbanos a través de los SUDS.

El concepto de servicios ecosistémicos hace referencia al valor de los servicios ambientales que la naturaleza provee a la sociedad, ya que depende en una multitud de formas sobre los servicios prestados por los ecosistemas y sus componentes: agua, suelo, aire, nutrientes y organismos. Muchos de los SUDS, imitan el medio natural por lo que, creando una red urbana de infraestructuras verdes y dando tiempo para el asentamiento de la biodiversidad en ellas, las ciudades serán capaces de generar un amplio margen de beneficios sociales, ambientales y económicos para los ciudadanos.

Algunos de los servicios ambientales o ecosistémicos suministrados por los SUDS son:

- **Proporcionan agua de lluvia como recurso para diferentes usos**

Mediante la recolección de agua lluvia procedentes de los techos, se obtiene agua para diferentes usos como la limpieza de las calles o el riego de parques y jardines. Al recogerse y tratarse “in situ” esta agua, se evitan los costos de traerla desde el punto de abastecimiento (bombeo, colectores, tratamiento, etc.)

- **Proveen de un ambiente con menos contaminación atmosférica**

Muchos de los SUDS, como los techos verdes o los arriates de biorretención, se caracterizan por la necesaria presencia de plantas para su funcionamiento. Esta vegetación capta CO₂ atmosférico y contaminantes derivados del tráfico, mejorando la calidad del aire urbano. Además, cuando llueve, parte de los gases contaminantes son arrastrados por la lluvia y retenidos dentro de estos sistemas.

- **Proporcionar un medio ambiente urbano confortable térmicamente**

Algunas estrategias importantes del uso de los espacios verdes urbanos para mitigar el efecto “isla de calor” en las zonas urbanas, comprenden los techos verdes, de los que se ha demostrado que ayudan a regular el microclima urbano además de reducir los costos en climatización de los edificios (lo que supone además un ahorro en consumo energético).

El agua es muy importante moderando los microclimas urbanos. La evaporación desde estanques, áreas de biorretención, agua retenida en pavimentos permeables y otras masas de agua, junto con la evapotranspiración de los techos verdes, cunetas verdes o áreas de biorretención, proporcionan un efecto de enfriamiento dentro de las ciudades, minimizando el efecto “isla de calor”

- **Facilitar la presencia de espacios lúdicos y mejorar la calidad de vida de los habitantes**

La urbanización puede aumentar la exposición de factores de riesgo comunes de enfermedades como la diabetes, enfermedades respiratorias crónicas, obesidad, etc., y provoca más contaminación del aire, lo que causa enfermedades cardiovasculares y respiratorias. Por ello incluir SUDS vegetados como estanques de retención, zonas de biorretención o techos verdes, no sólo tienen ventajas hidrológicas y paisajísticas, sino que, según el Instituto de Salud Global, beneficia la salud física y mental de las personas.

- **Aumentar la diversidad biológica autóctona**

El empleo de plantas autóctonas instaladas de forma correcta en diferentes SUDS situados en parques, bordes de carreteras, jardines o techos, permitirá que obtengan allí su sustento, pequeños mamíferos, aves, reptiles, anfibios o insectos. Además, técnicas como los jardines de lluvia (un tipo de sistema de biorretención) proporcionan un hábitat a polinizadores autóctonos como las abejas, las cuales han disminuido de manera alarmante en los últimos años, y

son de extrema necesidad para el mantenimiento natural de muchas especies vegetales, incluidas muchas que sirven de alimento.

Problemas que los SUDS pueden ayudar a controlar en el AMSS

- La frecuencia de las inundaciones provocadas por la incapacidad del sistema.
- Las descargas de agua contaminada directamente a quebrada.
- La erosión de los cauces receptores de las aguas de escorrentía urbana.
- La degradación de medios naturales y urbanos.
- El efecto “isla de calor”.
- La falta de pequeñas zonas verdes en los núcleos urbanos de los diferentes municipios.
- Control de la escasez de agua en época de sequía
- Los sobrecostos en la construcción de infraestructuras protectoras aguas abajo.

Soluciones que aportan los SUDS.

La razón de que los SUDS sirvan de solución a problemas de diversa índole, es su multifuncionalidad, es decir, su capacidad para tener diferentes aplicaciones, no sólo la de reducir los daños causados por las inundaciones.

Ya se ha visto en un apartado anterior que tienen diferentes funciones como almacenar, tratar o transportar el agua y mediante una selección ordenada de los distintos SUDS en una cadena de drenaje, estas funciones pueden aportar una amplia variedad de servicios como:

– Reducción de los volúmenes de escorrentía y los caudales pico

Muchos SUDS propician la infiltración y/o la evapotranspiración, evitando que un porcentaje del volumen precipitado vaya a la red de alcantarillado o se vierta

directamente al medio. Otros propician su almacenamiento “in situ”. En ambos casos se reducen los caudales punta, lo que puede solucionar la incapacidad hidráulica de la red de colectores existentes debida al crecimiento del entorno urbano. Con su implantación (que suele ser a nivel superficial) se consigue evitar la necesidad de desdoblamiento de la red convencional, de tener que construir grandes infraestructuras de drenaje secundario o el hecho de padecer inundaciones por incapacidad de los colectores, de forma frecuente; además, al reducirse los caudales punta, también se atenúa la erosión en los cauces.

– **Protección de la calidad del agua**

La escorrentía urbana lleva inmersa una gran cantidad de contaminantes de diversa naturaleza y procedencia, que se depositan en el suelo y varía en tiempo seco (período entre lluvias) y se lavan con las tormentas; no obstante, siempre hay sólidos en suspensión, materia orgánica, hidrocarburos, aceites, herbicidas, pesticidas y múltiples contaminantes originados en las actividades normales de cualquier ciudad que, si no se retiran, son arrastrados por las lluvias y vertidos a las quebradas, provocando daños ambientales y estropeando las masas de agua, haciéndolas inservibles para su consumo.

Una de las cualidades más importantes de los SUDS, es su capacidad de retener y/o eliminar elementos contaminantes de las aguas de escorrentía urbana. Capacidad resultante de una compleja combinación entre mecanismos, tales como la sedimentación, adsorción, degradación microbiana, precipitación, filtración, volatilización, fotólisis o la retención vegetal.

– **Mejora paisajística**

Muchos SUDS son infraestructuras verdes, con elementos vegetados, que pueden actuar también como elementos ornamentales, como arriates en calles y avenidas o como espacios verdes en zonas más amplias. Suponen elementos

estéticos que incluyen y visibilizan el ciclo del agua en el entorno urbano empleando componentes que imitan la naturaleza.

– **Proporcionar un medio ambiente urbano saludable y comfortable**

El agua es muy importante moderando la climatología y los microclimas urbanos; dado que la mayor parte del suelo del AMSS está sellada o impermeabilizada, no hay poros que contengan agua, lo que unido al bajo Albedo de la superficie urbana provoca que la temperatura esté por encima de la media de las zonas boscosas adyacentes y la sensación térmica sea más calurosa. La evapotranspiración que se da desde muchos SUDS proporciona un efecto de enfriamiento dentro de las ciudades, minimizando el efecto isla de calor. Por ello, algunas estrategias para mitigar los efectos del Cambio climático asociados a las altas temperaturas urbanas utilizan SUDS que almacenen agua in situ, que tengan vegetación que den sombra o que aumenten la evapotranspiración.

Otro inconveniente para el bienestar relacionado con el proceso de urbanización es el aumento a la exposición de factores de riesgo que producen enfermedades como la diabetes, enfermedades respiratorias crónicas o la obesidad. Este incremento del riesgo para la salud está íntimamente relacionado con la presencia de gases contaminantes procedentes del tráfico y la falta de espacios públicos para realizar ejercicio físico. Los SUDS, al disponer de vegetación, captan parte de los contaminantes atmosféricos, y al tratarse de infraestructuras multifuncionales, algunas pueden ser espacios para que el público los emplee en época seca (por ejemplo, como estadio de fútbol, zona para correr o área de conciertos y para almacenar escorrentía en época de lluvias.

– **Una nueva fuente para el recurso agua**

Mediante la recolección de aguas pluviales procedentes de las cubiertas de edificios públicos y/o privados, se obtiene agua a la que puede darse diversos usos, como la limpieza de vías y aceras o el riego de parques y jardines. Al

recogerse y tratarse “in situ” esta agua, se ahorran costos de abastecimiento y se dispone de un almacenamiento para la época seca. Ésta es una actuación común en zonas rurales de El Salvador, y no tanto en las urbanas, donde la red de abastecimiento alcanza a casi la totalidad del AMSS, aunque actualmente ya se están construyendo algunos proyectos en con sistemas de reuso de aguas lluvias, de los cuales al menos uno de ellos cuenta con un sistema de pretratamiento. Pero teniendo en cuenta que es una forma de acceder a un recurso que a veces es escaso, su incorporación puede suponer una ventaja en el desarrollo urbano.

– **Diversidad biológica urbana**

El uso de SUDS, implica introducir vegetación dentro de la ciudad, preferentemente plantas autóctonas, que son las que mejor aguantan las condiciones climatológicas y menor gasto en mantenimiento tienen. En una gestión urbana sostenible, la adecuada colocación de los SUDS puede actuar como corredor verde de interconexión de las zonas boscosas adyacentes, permitiendo el paso de pequeñas especies animales y ayudando a preservar la rica biodiversidad de la zona.

2.5.8. Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible.

La variedad de componentes de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible que existen actualmente es bastante amplia. Hay diferentes formas de catalogarlos dependiendo de varios factores, como por ejemplo de si requieren de alguna clase de construcción, si actúan donde se genera la escorrentía o aguas abajo, de cómo tratan la contaminación del agua, etc... Las más comunes son las que distinguen entre las medidas de control en origen y las de control en vertido y las que separan entre medidas estructurales (acciones preventivas que no requieren de la construcción de infraestructuras) y no estructurales (elementos que requieren de construcción).

2.5.9. Componentes estructurales de los Sistemas de Drenaje Sostenible

- **Cubiertas verdes:** Sistemas multicapa, con vegetación que se localizan en las cubiertas de edificios.
- **Superficies permeables:** Superficies de diferente naturaleza que permiten que el agua de lluvia y la escorrentía pasen a su través, infiltrándose en el suelo o reteniéndose en capas subsuperficiales.
- **Depósitos de lluvia:** Son depósitos que se emplean para recoger y almacenar el agua de lluvia.
- **Pozos de infiltración:** Son pozos de poca profundidad, rellenos de material granular o geoceldas, en los que se retiene la escorrentía mientras que se filtra en el subsuelo.
- **Zanjas de infiltración:** Excavaciones poco profundas y alargadas rellenas de gravas o geoceldas, que crean un almacenamiento subterráneo temporal para la infiltración de la escorrentía.
- **Estanques de infiltración:** depresiones en el terreno de forma irregular y cubiertas de vegetación que almacenan e infiltran gradualmente la escorrentía generada en las superficies adyacentes.
- **Áreas de biorretención:** Áreas vegetadas, algo deprimidas, con un suelo modificado para favorecer la filtración y, en muchos casos, la infiltración de la escorrentía en el terreno.
- **Cunetas verdes:** Son canales amplios y poco profundos con vegetación, con la función de transportar la escorrentía.
- **Franjas filtrantes:** Áreas uniformes de pendiente suave cubiertas de un denso césped o hierba.
- **Depósitos de detención:** Son depósitos que almacenan temporalmente la escorrentía generada aguas arriba, laminando los caudales punta y atenuando los picos de caudal.

- **Estanques de retención:** Son lagunas artificiales que permiten mantener algo de flora y fauna acuáticas. Garantizan largos periodos de retención de la escorrentía, de 2 a 3 semanas.
- **Humedales artificiales:** Masas de aguas artificiales que imitan humedales naturales, con alta densidad de vegetación, diferentes especies animales y un volumen de agua permanente.

En algunas recomendaciones, se incluyen también los filtros de arena, que son lechos filtrantes por los que circula la escorrentía, quedando los contaminantes arrastrados allí retenidos. Pero son una técnica para el control casi exclusivo de la calidad del agua, no de la cantidad, por lo que no se contemplan en la guía *SUDS*.

2.5.10. El Tren o Cadena de Drenaje.

La cadena de gestión utiliza una secuencia lógica de técnicas de drenaje urbano sostenible que permite que la escorrentía pase a través de varias estructuras, donde es tratada antes de llegar a la masa de agua receptora. De esta manera se consigue reducir la contaminación, el caudal pico y los volúmenes de escorrentía.

Este concepto es fundamental para el diseño de los *SUDS*; trata de cómo se emplean estos sistemas de forma encadenada, con el objetivo de reducir progresivamente la contaminación, los caudales pico y los volúmenes. Por ello, en muchos casos, no es recomendable escoger las técnicas de forma individualizada, sino hacerlo con una visión de conjunto.

Al igual que en una cuenca natural, las técnicas sostenibles de drenaje urbano pueden emplearse en serie para cambiar las características de la escorrentía, ajustándolas a cómo serían en una etapa de pre-desarrollo urbanístico.

Los eslabones que componen una cadena de gestión son, por orden:

- **Prevención: Aplicación de medidas no estructurales**, consiste en:
 - Planificación y diseño adecuados, por ejemplo, disminuyendo el porcentaje de suelo impermeable en nuevas urbanizaciones.
 - Medidas de limpieza para prevenir o reducir la contaminación en la escorrentía, por ejemplo, barrer para eliminar el polvo y los detritos de los parqueos.
 - La recogida y utilización del agua de lluvia.
- **Control en el origen**: control de la escorrentía en el mismo lugar donde se origina o en sus inmediaciones. Algunas técnicas que sirven de control en origen son, por ejemplo, los pavimentos permeables o las cubiertas verdes.
- **Gestión del agua a escala local o en el entorno urbano**: Gestión del agua a nivel local como, por ejemplo, la escorrentía de los tejados de edificios y parqueos, que se conduce hacia un pozo de infiltración, o a un depósito de retención. El tiempo de detención debe ser suficiente para la sedimentación de sólidos en suspensión, y el volumen de detención debería ser suficiente para atenuar los caudales pico.
- **Gestión de la escorrentía a nivel de cuencas o a escala regional**: Para este tipo de gestión se suelen emplear por lo general depósitos de detención, de retención o humedales artificiales. Normalmente suelen emplearse en áreas de drenaje grandes.

En la gestión sostenible de la escorrentía, siempre que sea posible, lo primero será implantar medidas preventivas. Si no fueran suficientes o efectivas (se produce escorrentía o lleva contaminación) se pasará al control en el origen (medidas que tratan de evitar la generación de la escorrentía), y así consecutivamente con el resto de los eslabones.

Aunque la definición de cadena de drenaje está enfocada a imitar el ciclo hidrológico natural en entornos urbanos mediante técnicas de drenaje sostenible, también pueden emplearse SUDS con las denominadas infraestructuras grises en aquellos casos que sea necesario para una mejor continuidad del ciclo.

2.5.11. Similitudes y diferencias entre el drenaje convencional y los SUDS.

Los SUDS, al igual de las redes de tuberías y colectores, son elementos de drenaje secundario o microdrenaje, por lo que comparten funciones y algunas características:

- Su principal objetivo es evitar inundaciones urbanas.
- Su diseño y dimensionamiento parten de un exhaustivo estudio de la hidrología, de la hidráulica y del terreno.
- Conducen y almacenan la escorrentía, previniendo que se concentre en determinados puntos críticos.

Pero, dada la naturaleza multifuncional de los SUDS, las diferencias entre el drenaje convencional y el sostenible comprenden varias facetas:

- La principal es que los SUDS no consideran las masas pluviales como un deshecho a evacuar rápidamente, sino como un recurso que se puede almacenar para su posterior uso, emplear como elemento estético o infiltrar en el subsuelo para recargar acuíferos.
- Otra faceta importante es relativa a la gestión de la contaminación; en la red de alcantarillado convencional, el agua no es tratada para eliminar contaminantes y, por el contrario, en todos los SUDS tiene lugar como mínimo un procedimiento descontaminante.

- En la gestión convencional de aguas lluvia se van sumando los caudales que van entrando por las redes de tuberías y colectores hasta llegar a un punto final con un caudal pico importante.
- La gestión sostenible de la escorrentía supone su manejo en el punto donde se genera, impidiendo que se vayan agregando más caudales en la red.
- Las redes de drenaje convencionales se componen principalmente de colectores subterráneos que no se ven y no tienen valor estético alguno. En cambio, muchos SUDS son infraestructuras verdes superficiales que incrementan el valor estético allí donde se implantan.

Características básicas de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Los Sistemas de drenaje urbanos sostenible abarcan una gran variedad de elementos o técnicas que pueden catalogarse de diferentes formas dependiendo de varios factores, como por ejemplo de si requieren de alguna clase de construcción, si actúan donde se genera la escorrentía o aguas abajo, de cómo tratan la contaminación del agua, etc.

Un primer tipo de clasificación, y la más simple de todas, es la que distingue las medidas entre estructurales y no estructurales:

- Las medidas estructurales son aquellas que gestionan la escorrentía mediante actuaciones que contengan algún elemento constructivo
- Las no estructurales son las que no precisan ni una actuación directa sobre la red, ni la construcción de infraestructura alguna.

A su vez, las medidas estructurales pueden dividirse según el principal proceso que se produce en ellas:

- **Filtración**, ocurre cuando se hace pasar el agua a través de diferentes medios como puede ser un geotextil, una superficie con grama o un lecho de gravas, este

proceso sirve para retener partículas contaminantes, pero no es efectivo en el control del volumen de escorrentía.

– **Infiltración**, se produce cuando se permite que el agua de lluvia se introduzca por los poros del subsuelo de manera que el flujo que iría escurriendo por la superficie del terreno se transforma en flujo subterráneo. Este proceso reduce la cantidad total de escorrentía generada.

– **Detención**, se produce cuando se almacena durante un breve periodo de tiempo la escorrentía antes de que se incorpore a la red de drenaje o se vierta al medio natural.

– **Retención**, es el almacenamiento durante un período de tiempo prolongado de la escorrentía, parte de ese volumen almacenado es susceptible de evaporarse, infiltrarse o ser captado por la vegetación.

Características básicas de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

– **Recolección**, es la cosecha de las aguas lluvias para su posterior consumo.

– **Otros tratamientos de la calidad de la escorrentía**, en muchas técnicas se retienen y eliminan partículas en suspensión por procedimientos diferentes a la filtración como la bioacumulación, el metabolismo bacteriano, la absorción radicular ó también, según el lugar de la cadena de gestión de control de aguas lluvias donde se localicen:

– **Medidas de control en origen o aguas arriba**: Métodos de control que se aplican “in situ”, o sea, en el mismo lugar donde se genera la escorrentía.

– **Medidas de control en vertido o aguas abajo**, son las que se emplean sobre la escorrentía una vez generada de forma previa a su vertido al medio.

Éstas no son las únicas formas de clasificar los diferentes SUDS, y en la mayoría de los casos, un mismo SUDS puede pertenecer a una o más categorías. Por

ejemplo, un área de biorretención puede ser un sistema de detención, de infiltración y de filtración.

Técnicas de drenaje urbano sostenible cuyo principal uso es el control de las aguas lluvias en origen:

Cubiertas verdes: Sistemas multicapa, con vegetación que se localizan en las cubiertas de edificios.

Superficies permeables: Superficies de diferente naturaleza que permiten que las aguas lluvias y la escorrentía pasen a su través.

Depósitos de recolección de aguas lluvia: Son depósitos que se emplean para recoger y almacenar el agua de precipitación.

2.5.12. Guías técnicas para la implementación de los SUDS.

En El Salvador no existe como tal, una Normativa que regule a los SUDS por completo; sin embargo, para el año 2003, se determinó que, con el fin de habilitar permisos de construcción y de que los proyectos contaran con punto de descarga sin afectar a la red de drenajes que no tenía capacidad hidráulica, era necesaria la implementación de Sistemas de Detención, elementos que para entonces aún no eran considerados dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

Para 2009, se realiza una reforma al Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los Municipio Aledaños incluyendo el artículo V.14, en el que los ya mencionados dispositivos de control de escurrimiento pluvial, como los sistemas de detención o retención, deberán ser considerados en los proyectos u ocupaciones en los que se generen superficies impermeables, a fin de garantizar la condición de Impacto Hidrológico Cero (IHC), dando pie con esto, a la implementación reglamentaria de los SUDS.

Posteriormente, y atendiendo a la necesidad de alternativas sustentables en cuanto a los sistemas de drenaje y a las problemáticas que se generan alrededor de estos, la OPAMSS publica, en el año 2019, la Guía Técnica para el Diseño de SUDS en el AMSS, con lo cual se tiene una herramienta de gran ayuda en la gestión y manejo de las aguas lluvias.

2.6 Proceso de diseño de SUDS en el AMSS.

2.6.1 Fases del Diseño y Objetivos de Diseño de los SUDS.

En el Módulo 2 de la Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS (Guía SUDS) se encuentran los pasos a seguir en el diseño de los SUDS de forma clara y esquematizada, esta toma en cuenta las pautas establecidas en la “Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los municipios aledaños” para que pueda ser aplicada a proyectos y facilitar la obtención de los puntos e incentivos fijados en la guía HAUS para la construcción sostenible.

A continuación, se presentan las fases del proceso de diseño de SUDS de manera resumida:

1) Fase 1 del diseño: Caracterización de la zona del proyecto.

- a. Datos de partida.
- b. Estudio y análisis de las características de la zona del proyecto.
 - i. Análisis de las potenciales zonas de infiltración.

2) Fase 2 del diseño: Creación de un modelo conceptual (Cadena de Drenaje).

- a. Los sistemas de gestión sostenible de aguas lluvia.
- b. Establecimiento de una cadena de drenaje.
 - i. Eslabón 1: Prevención.
 - ii. Eslabón 2: Control en el origen.
 - iii. De un eslabón a otro. Sistemas de transporte.

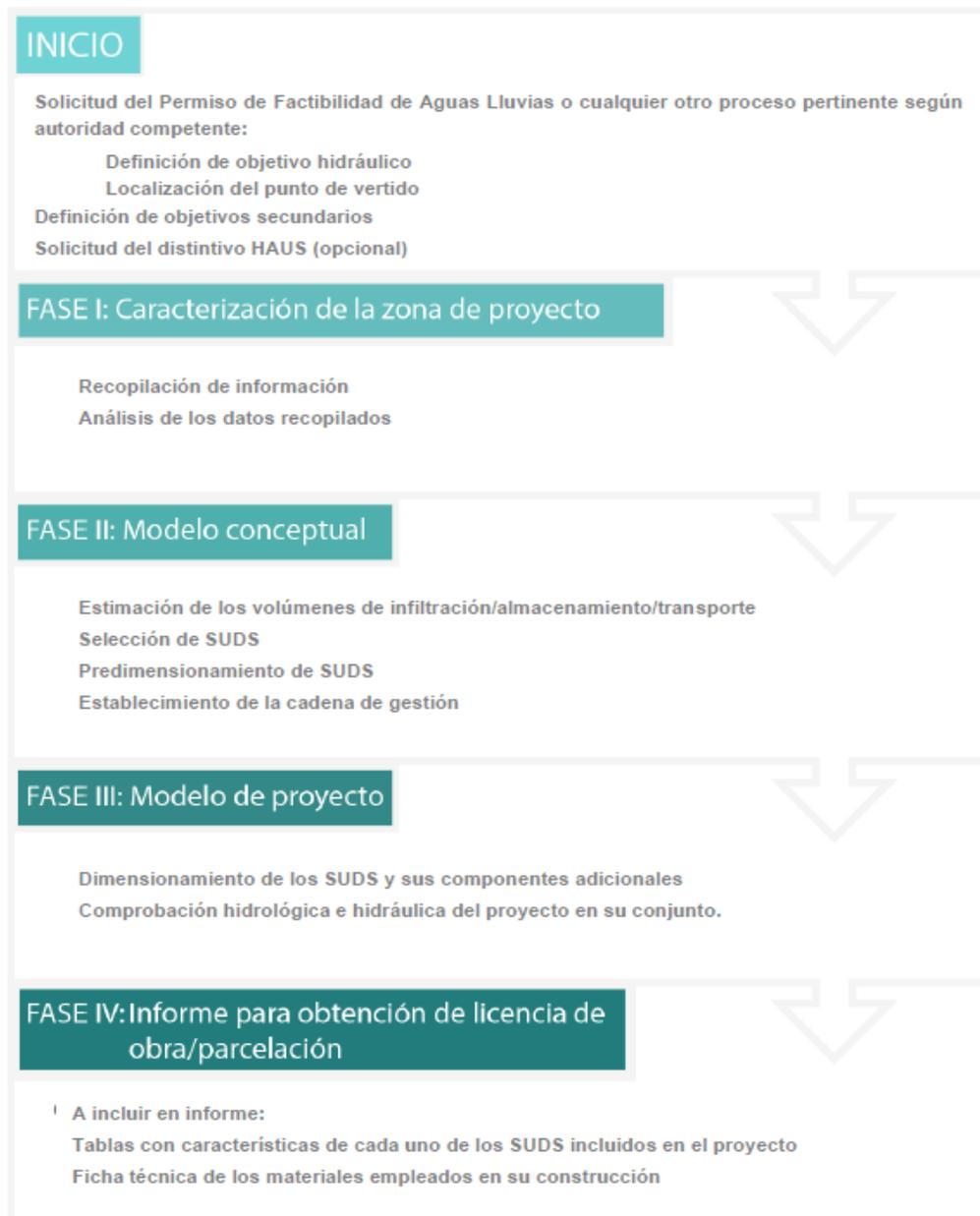
- iv. Eslabón 3: Control Local.
- v. Eslabón 4: Control regional.
- c. Optimización de la cadena de gestión.
- d. Resultados obtenidos en la primera mitad del proceso de diseño.

3) Fase 3 del diseño: El proyecto SUDS.

- a. Paso 1: Comprobación hidrológica e hidráulica de cada sistema propuesto considerando los requerimientos a la entrada y a la salida de cada uno de ellos.

 - b. Paso 2: Acercamiento al proyecto constructivo.
 - i. Definición de las tareas de Mantenimiento.
 - c. Paso 3: Creación de un modelo de simulación *SUDS*.
- 4) **Fase 4:** Informe final de diseño para obtención de licencia de obra/parcelación.

Figura 13. Fases generales en el diseño de un sistema urbano de drenaje sostenible.



Fuente: OPAMSS, Módulo 2 Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 3.

El comienzo de un proyecto en donde se va a implantar uno o varios SUDS se inicia con un estudio del lugar. El nivel de datos a recopilar y los análisis

necesarios dependerán de la envergadura del proyecto, no se requerirá lo mismo para una casa con parcela que para un proyecto de parcelación o construcción de una urbanización.

Para el primer caso, es decir, áreas inferiores a los 500 metros cuadrados, tanto obra nueva como remodelaciones, la información mínima de partida sería:

- Pluviometría.
- Plano catastral.
- Plano constructivo del proyecto.
- Ensayos de permeabilidad (si se va a realizar la infiltración).
- Normativa y legislación que aplique.

Los estudios básicos a realizar serían:

- Cálculo de caudales.
- Estimación de los potenciales volúmenes de infiltración.
- Evaluar que se respetan colindancias vecinales y la presencia de taludes cerca de la zona de estudio.

Este nivel de análisis se emplea para sistemas de control en origen, aquellos que gestionan las aguas lluvias ahí donde caen evitando en algunos casos que se produzca. Para proyectos de mayor envergadura se requerirá mayor información y análisis más detallados¹¹.

Objetivos de diseño de los SUDS.

Antes de proceder al diseño de cualquier elemento de drenaje hay que establecer cuál es el principal objetivo que deberá cumplir dicho elemento, que suele ser minimizar los riesgos derivados de la escorrentía urbana (inundaciones) y evacuarla de manera segura hacia un punto de vertido.

¹¹ Guía SUDS, Capítulo 4,

Los *SUDS*, al ser elementos multifuncionales, además de perseguir el objetivo proteccionista de disminuir el riesgo de inundación dentro de los municipios, pueden ser útiles para la consecución de otros objetivos de diferente naturaleza (de calidad del agua, de mejora paisajística, de adaptación al cambio climático, etc.).

A continuación, se exponen algunos posibles objetivos que pueden cumplir los *SUDS* en el *AMSS*:

- **Hidrológicos**, reducir la escorrentía generada en los cambios de usos del suelo. Cuando se urbaniza sobre un terreno natural, se impermeabiliza el suelo aumentando el caudal potencial de la escorrentía tras una tormenta. Un objetivo del establecimiento del *SUDS* puede ser contrarrestar este efecto para que la urbanización no produzca grandes cambios en la generación volúmenes de aguas lluvias.
- **Hidráulicos**, muchas de las redes del *AMSS* han quedado obsoletas y no siempre son capaces de transportar todo el caudal de escorrentía, provocando inundaciones por incapacidad hidráulica. Uno de los propósitos de implantación de los *SUDS* es la gestión de este excedente, la laminación de los caudales punta para que el sistema existente no colapse y que no circulen caudales que pueden poner en peligro la integridad de bienes y personas por las calles.
- **Mejora de la calidad del agua**. Otro de los motivos por los que es útil implantar *SUDS* es evitar que, tanto al medio natural como a la red de colectores, lleguen partículas que puedan perjudicar los ecosistemas, en caso de vertido en aguas naturales, o depositarse en los tubos reduciendo su sección útil.
- **Reducir la erosión en cauces**. El *AMSS* está atravesado por varios ríos y quebradas a las que se vierte directamente aguas lluvias. Estas descargas se realizan en puntos localizados y provocan la erosión en la solera y laterales

de los cauces, lo cual puede provocar desprendimiento de terreno. Los SUDS pueden emplearse en este caso para reducir la energía con la que se desagua la escorrentía y minimizar el riesgo de erosión.

- **Económicos**, minimizar el costo de las infraestructuras de drenaje existentes o en proyección. Como ya se ha mencionado, los SUDS retienen partículas que pueden hacer colapsar la red o provocar otros perjuicios, estas partículas se pueden retener en SUDS, así se alarga la vida útil de la infraestructura y se reducen los requerimientos de mantenimiento.
- **Captación de agua para consumo**. El aprovechamiento del agua de lluvia es muy frecuente en zonas rurales, también puede realizarse dentro del AMSS.
- **Paisajísticos**, Muchos SUDS tienen valor estético, parecen arriates o zonas verdes, y pueden implantarse con objeto de mejora paisajística capaz de optimizar la gestión del agua del entorno donde se ubican.

Aunque son múltiples los objetivos que puede perseguir el proyecto, el más importante de todos es el control de la escorrentía, por lo que los pasos de diseño están enfocados a la consecución de objetivos hidráulicos-hidrológicos, lo que no impide que se puedan adoptar otros objetivos secundarios, como la mejora paisajística, captura de CO₂ o el incremento de la resiliencia al cambio climático.

Criterios básicos de diseño.

Tras el establecimiento de los objetivos de diseño, los proyectistas deben considerar algunos criterios básicos que orientan las soluciones de drenaje de aguas lluvias de la zona a urbanizar:

- Respetar lo impuesto en la Normativa referente al drenaje en el AMSS.
- Evitar la inundación de calles y bienes para el período de retorno preestablecido de 10 años.
- Minimizar los riesgos derivados de la ocurrencia de tormentas con un mayor periodo de retorno que el establecido en la legislación.

- Si se trata de una nueva urbanización en terreno natural, el proyecto no debe generar mayores caudales máximos que los que se producían antes de urbanizar o los establecidos por OPAMSS.
- Respetar el sistema de drenaje natural de la zona, el trazado de las quebradas y cauces naturales existentes. En lo posible incorporarlo a las áreas verdes para ser utilizado como drenaje del lugar, minimizando los impactos de la urbanización sobre el sistema natural de la cuenca hacia aguas abajo.
- Atender a los lineamientos establecidos por la autoridad ambiental competente.

2.6.2 Fase 1: Caracterización de la zona de proyecto.

La selección y diseño de los SUDS es un proceso multidisciplinar que no está limitado a un área de especialización en particular, por lo que en la caracterización de la zona donde se va a implantar un proyecto que los contenga, hay que examinar factores de variada naturaleza, como por ejemplo:

a. Datos de partida.

Los datos de partida necesarios para el diseño de un sistema de gestión sostenible de aguas pluviales dependerán de la envergadura del proyecto.

A continuación, en los siguientes cuadros se presenta la información relevante de cada disciplina que involucra un proyecto SUDS y enumeran los datos básicos, aunque para pequeños proyectos de gestión de agua de cubiertas de pequeña extensión o del patio trasero de una casa, no harán falta todos..

Cuadro 13. Datos de partida necesarios.

		Información Relevante.	Comentarios.
i.	Normativa y Recomendaciones	En caso de nuevas urbanizaciones o remodelaciones de espacios ya urbanizados se debe cumplir con el <i>RLDOT del AMSS</i> para aprobar el trámite de <i>Factibilidad de Aguas Lluvias</i> .	En el <i>RLDOT</i> se especifica un $Tr= 10$ años para lluvias de diseño para proyectos urbanos.
		En el instructivo <i>Trámites Previos</i> para la obtención de permisos se ubica la factibilidad de drenaje de aguas lluvias que establece los puntos que ha de completar el proyecto.	Puntos como el estudio topográfico o las parcelaciones, que también servirán de base para el análisis previo para la implantación de <i>SUDS</i> .
		En lo relativo a la calidad del agua, existe el <i>Reglamento Técnico Salvadoreño "Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor"</i> pero este no aplica a aguas lluvias que pueden verterse directamente.	Se intentará generar un tren de drenaje con elementos capaces de retener parte de los contaminantes para evitar la degradación de las quebradas naturales.
ii.	Precipitación	Los datos mínimos necesarios a solicitar son los referentes a las máximas lluvias diarias o las curvas IDF de la estación más cercana a proyecto.	Estos datos los proporciona la autoridad competente de meteorología e hidrometría (<i>MARN</i>).
		Se emplea la metodología conocida como " <i>Small Storm Hydrology</i> ", enfocada a la gestión de los eventos pequeños y frecuentes, que ya no parte de precipitaciones máximas, sino de registros diarios en secuencias de diez minutos, datos que también se pueden obtener desde la autoridad competente.	Los <i>SUDS</i> tratan de imitar la hidrología predesarrollo urbanístico caracterizada por absorber la mayor parte de las precipitaciones frecuentes, retardando y reduciendo la escorrentía.
iii.	Topografía	Puesto que los <i>SUDS</i> son obras de microdrenaje la escala mínima de trabajo recomendada para la delimitación de las cuencas urbanas es de 1:1000, pero lo recomendable es realizar un levantamiento topográfico in situ para tener el mayor detalle posible.	La topografía natural se va a ver alterada durante el proceso de urbanización, por lo que también es necesario disponer de: -Proyecciones previstas. -Cotas de nuevos elementos.
iv.	Infraestructuras Existentes	La información relativa a localización de pozos y tragantes de la zona de estudio o de la red donde acometerá el proyecto se han de solicitar en el <i>MOP</i> .	Si en el <i>MOP</i> no se tiene inventario de la red de la zona, el titular del proyecto debe realizar el levantamiento de la red afectada, analizar la capacidad hidráulica de la misma y presentar a <i>OPAMSS</i> para su evaluación.

		Información Relevante.	Comentarios.
v.	Planos Catastrales	Tanto los actuales como los que contemplen las modificaciones que conllevará la ejecución del proyecto de urbanización o reforma en el que se incluirán los <i>SUDS</i> .	Los planos catastrales pueden solicitarse en el <i>CNR</i> .
vi.	Planos de usos del suelo	Es necesario conocer el uso de suelo en el que se enmarca el proyecto, basado en mapa de tratamientos urbanísticos del <i>Esquema Director</i> . El tratamiento, aptitudes y estándares de usos del suelo de la zona de proyecto se definen en el trámite <i>Calificación de Lugar</i> en <i>OPAMSS</i> .	Aunque los <i>SUDS</i> , por definición se instalan en suelo urbano, no se limitan únicamente a esta clasificación, pudiendo instalarse en zonas rurales, industriales, y/o comerciales. Cada uso de suelo confiere unas características a la calidad de la escorrentía.
vii.	Geología	Para conocer la clase de suelo en el que se va a ubicar un proyecto, se puede recurrir a los mapas ¹² que facilita el <i>Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET)</i> y, en todo caso (en función de la envergadura del proyecto) es imprescindible que se realicen calicatas " <i>in situ</i> " para verificar que efectivamente no se proyecta ningún dispositivo de infiltración sobre ese tipo de suelo.	La mayoría de los municipios del <i>AMSS</i> están asentados sobre materiales piroclásticos, la denominada tierra blanca joven, y sobre efusivas ácidas, las tobas color café, ambas muy susceptibles a los movimientos de ladera y a la erosión.
		Es recomendable descartar la zona de riesgo para la instalación de los <i>SUDS</i> desde comienzo de proyecto. Para ello se puede consultar el Anexo 22 ¹³ : " <i>Peligrosidad por dinámica superficial según geomorfología</i> " dentro del <i>RLDOT del AMSS de OPAMSS</i> , lo que no excluye que se hagan estudios más exhaustivos sobre el terreno.	Tampoco hay que olvidar que en el <i>AMSS</i> se producen con frecuencia desprendimiento de laderas, muchas veces asociados a tormentas. Algunos <i>SUDS</i> fomentan la infiltración, con lo que el suelo se empapa, adquiere un mayor peso y si está cerca de un talud, éste puede desprenderse.
viii.	Hidrología	Si el proyecto desagua en una quebrada o río, habrá que conocer la sección de los posibles puntos de vertido y las láminas de inundación para $Tr=50$ años o el determinado por <i>OPAMSS</i> .	Una forma de mejorar el estado fluvial es procurando un tren de drenaje con capacidad para evitar erosiones en cauces y vertido de contaminantes.

¹² Mapas disponibles en: <http://www.snet.gob.sv/ver/geologia/geologia+de+el+salvador/>

¹³ Anexos disponibles en: <https://geoportal.opamss.org.sv/portal/>

		Información Relevante.	Comentarios.
			Algunos <i>SUDS</i> superficiales no deben instalarse en localizaciones que se inundan con frecuencia a causa del desbordamiento de ríos y quebradas.
ix.	Hidrogeología	<p>La importancia de los datos hidrogeológicos deriva de que muchas de las técnicas <i>SUDS</i> emplean la infiltración para gestionar la escorrentía. Si esa escorrentía arrastra contaminantes y no es correctamente tratada puede alcanzar los acuíferos del <i>AMSS</i> desde donde se capta el agua para consumo humano.</p> <p>Es aconsejable investigar la cota del nivel piezométrico, si éste varía estacionalmente, la localización de los pozos de extracción de la zona de estudio o proyecto y cuál será la distancia mínima a los pozos a la que podrá realizarse la infiltración.</p> <p>Dentro del <i>RLDOT del AMSS</i>, específicamente en Anexos: 19, 20 y 21, se encuentran los mapas de recarga, vulnerabilidad y riesgos a la contaminación acuífera, para la cuenca del Río Acelhuate.</p>	En caso de que no haya problemas al respecto, para la fase 3 del proceso de diseño, habrá que corroborar mediante estudio geotécnico la distancia a la que se encuentra el acuífero de la superficie y la permeabilidad del suelo en sus distintas capas.
x.	Permeabilidad del suelo	<p>La importancia de la recopilación de datos de geología e hidrogeología van encaminados principalmente a determinar la capacidad de infiltración de la escorrentía en el subsuelo. Algunas de las funcionalidades de los <i>SUDS</i> es infiltrar la escorrentía para la recarga de acuíferos, la reducción del volumen de escorrentía o de los caudales pico.</p> <p>A modo de resumen se muestran algunos valores de permeabilidad obtenidos “in situ” de forma empírica para el Trabajo de Graduación de la Universidad de El Salvador titulado “Análisis de la infiltración, escorrentía subsuperficial y tendencia</p>	<p>La mayor parte de los materiales litológicos del <i>AMSS</i> son de tipo permeable, como se aprecia en el Cuadro 14.</p> <p>Si el proyecto se va a ejecutar sobre tierra blanca joven o tobas de color café, cuya permeabilidad puede ser idónea para la infiltración, no se podrá realizar por motivos de seguridad estructural.</p>

		Información Relevante.	Comentarios.
		direccional del movimiento del agua entre estratos de suelos del AMSS” en el cuadro 16.	Se muestran los coeficientes de permeabilidad de diferentes suelos según textura en el Cuadro 15.
xi.	Especies y biodiversidad	<p>Puesto que muchos SUDS son sistemas “vivos”, con vegetación, es interesante conocer cuáles son las especies más idóneas para plantar. Lo ideal es emplear vegetación autóctona por varios motivos, principalmente:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Está adaptada a la climatología, a las lluvias y a los períodos de estiaje. 2- Favorece la inclusión de corredores verdes dentro del AMSS y sirve de hábitat para otras especies animales. 3- Hay que evitar introducir especies alóctonas que puedan acabar siendo invasoras. <p>El proyectista deberá tener en cuenta el reglamento existente respecto a la vegetación en arriates según “Acuerdo No. 73 Instructivo para el cultivo de especies ornamentales en áreas urbanas” y también, en la “Guía para la Reforestación” del MARN se puede visualizar un listado con las especies arbóreas a incluir en las reforestaciones de áreas urbanas.</p>	Para facilitar la tarea del proyectista en la selección de vegetación, se enumeran las principales especies recomendadas para el AMSS por el Jardín Botánico de La Laguna En el cuadro 17.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-13.

Cuadro 14. Tipos de suelo del AMSS según permeabilidad de acuerdo a su litología y capacidad de infiltración.

Materiales litológicos del AMSS	Calificación
Lava volcánica y escorias reciente	Permeable
Piroclásticos retrabajados	Permeable
Aluvión reciente, gravas, arenas y arcillas cerca de ríos	Permeable
Aluviones Consolidados	Semi-permeable
Cenizas volcánicas	Semi-permeable
Tobas con intercalaciones de Piroclásticos y Lavas	Permeable
Tobas, mezcladas con pómez y escorias	Semi-permeable
Lavas basálticas	Semi-permeable
Tobas volcánicas y aglomerados	Semi-permeable
Rocas volcánicas ácidas, riolítica	Impermeable
Tobas epiclásticas volcánicas y tobas ardientes	Impermeable

Fuente: OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 9.

Cuadro 15. Valores orientativos del coeficiente de permeabilidad para diferentes suelos.

Coeficientes de permeabilidad (k) (m/s)		
10	Grava limpia	Infiltración rápida
10 ⁻¹		
10 ⁻²		
10 ⁻³	Arenas limpias/Arena limpia y mezcla de gravas	
10 ⁻⁴		
10 ⁻⁵		
10 ⁻⁶	Arenas muy finas / limos orgánicos e inorgánicos/ Mezclas de arena, limo y arcilla / Depósitos estratificados de arcilla	Infiltración moderada
10 ⁻⁷		
10 ⁻⁸		
10 ⁻⁹	Suelos impermeables como arcillas homogéneas o roca sin fisuras	Infiltración lenta (impermeable)
10 ⁻¹⁰		
10 ⁻¹¹		
10 ⁻¹²		

Fuente: OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 10.

Cuadro 16. Características de muestras de estudios sobre permeabilidad del suelo en el AMSS.

ID Muestra	LUGAR	MUNICIPIO	DESCRIPCIÓN GENERAL	K (m/s)
M-4	A un costado, en dirección Norte, de 75 av. Norte	San salvador	Estrato escoria meteorizada con presencia de óxido en la unión, con poca plasticidad de color café oscuro en la parte superior.	8.0926*10 ⁷
M-5	Cumbres de Cuscatlán	Antiguo Cuscatlán	Muestra de suelo compuesto por un estrato de material bastante suelto, de consistencia porosa y color café claro.	5.0734*10 ⁴
M-6	Alturas de Tenerife	Santa Tecla	Estrato de material de Plan de La Laguna, en su parte superior bastante duro y en la parte inferior suelo parecido	2.0597*10 ⁷

ID Muestra	LUGAR	MUNICIPIO	DESCRIPCIÓN GENERAL	K (m/s)
			a la escoria meteorizada de consistencia porosa color café oscura.	
M-7	Universidad de El Salvador	San Salvador	Muestra de suelo compuesto por dos estratos de TBJ, el superior de un color gris claro y el segundo con un color gris más oscuro, se presenta abundantes raíces y en la parte inferior se encuentra piedra pómez en descomposición.	1.3154*10 ⁶
M-8	Jardines de la Sabana	Santa Tecla	Muestra de suelo compuesto por dos estratos, el superior por TBJ color gris pardo y el segundo denominado Flujo de Escombros con color café oscuro con poca humedad, este estrato posee mucha roca madre (Módulos de diámetros grandes) que está en descomposición por sectores.	1.0497*10 ⁶

Fuente: OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 11.

Cuadro 17. Especies recomendadas para el AMSS.

Árboles	Arbustos	Especies que permiten el encharcamiento:	Especies para zonas semihúmedas:
-Copinol -Pie De Venado -Nacazcol -Cacao -Cortez blanco y negro -Maquilishuat	-Crotos -Duras -Ixora Híbridas -Suculentas como Cactus y Agaves -Cicas	-Papiros -Tule -Helechos -Ginger -Ninfas -Aráceas	-Zacate Elefante -Listones -Gramas -Chalatecas -Japonesa -Bambú Enano

Fuente: OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 12.

b. Estudio y análisis de las características de la zona del proyecto.

Una vez recopilada la información, hay que proceder a su análisis, es decir a la caracterización de la zona de estudio o proyecto. En esta caracterización hay que tener en cuenta de que por un lado se evaluará la zona como está ahora y además cómo quedará con el desarrollo urbanístico, y se hará el estudio y análisis de las características de la zona del proyecto.

A continuación, se muestra un cuadro donde se resume las características del proyecto:

Cuadro 18. Estudio y análisis de las características de la zona del proyecto.

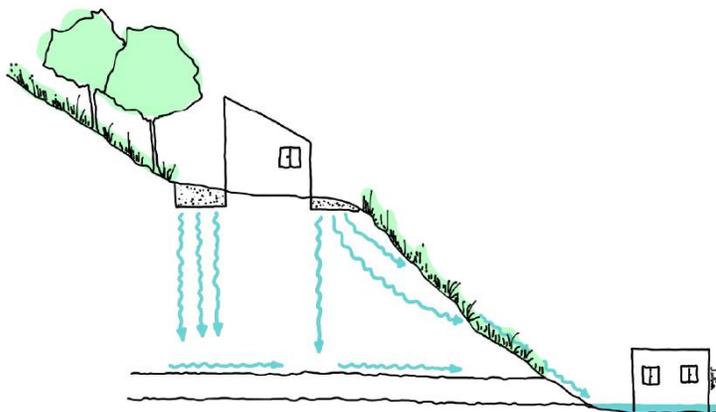
	Tipo de Estudio.	Información Relevante.	Comentarios.
i.	Estudio del terreno.	Los datos recopilados servirán para conocer mejor la naturaleza del lugar donde se va a ejecutar el proyecto, determinar las potenciales ubicaciones de los <i>SUDS</i> y evaluar los posibles riesgos que puedan surgir.	Parte de estos datos procederán ensayos. Éstos deberán ejecutarse acorde con el <i>RLDOT del AMSS</i> que establece que se han de realizar por un laboratorio de geotecnia e ingeniería de materiales que cumpla con lo especificado en la norma.
ii.	Establecimiento de los puntos de vertido.	Se analizan las posibles rutas del agua a partir de la topografía, del catastro y de la localización de las infraestructuras existentes. La designación del punto de vertido determinará las condiciones de contorno del posterior análisis hidrológico. Dentro del <i>AMSS</i> se distinguen dos tipologías de vertido de aguas lluvia: - Acometida a la red de microdrenaje. - Vertido directo a quebrada.	En ambos casos, hay que solicitar a la <i>OPAMSS</i> mediante el trámite de <i>Factibilidad de Drenaje de Aguas Iluvias</i> : - La ubicación. - Las condiciones que definen al punto de vertido. - Y caudal máximo a descargar.
		- Si se va a enviar la escorrentía a un pozo que conecta con una red de drenaje, habrá que tener en cuenta su capacidad máxima, su estado y condición estructural y el aumento de presión hidráulica que supondrá el proyecto. - Si se trata de una remodelación de una zona ya construida con su red de colectores, la inclusión de <i>SUDS</i> en la superficie supondrá una reducción del caudal punta, puesto que o se reduce la impermeabilidad del suelo o se retiene una parte del flujo que entra. - En los casos que se vierta directamente a quebrada, habrá que contemplar las posibles limitaciones que pueda establecer el <i>MARN</i> en referencia a la calidad de las aguas naturales.	Las diferentes técnicas <i>SUDS</i> tienen capacidades de retención y eliminación diferentes por lo que en el diseño conceptual habrá que seleccionar aquella combinación de técnicas que mejor capacidad de tratamiento tengan en función de la tipología de los contaminantes que se prevea que pueda arrastrar.
iii.	Establecimiento de los caminos del agua.	Una vez analizadas las posibles rutas de la escorrentía y establecidos por parte de <i>OPAMSS</i> los puntos por donde ha de salir el agua en el área de proyecto, mediante la topografía y los planos catastrales se definirán los caminos del agua, es decir, las vías preferentes por las que	Este paso facilitará la delimitación de las subcuencas urbanas.

	Tipo de Estudio.	Información Relevante.	Comentarios.
		circulará el agua superficial tanto en la situación actual como en el caso de que se haga una propuesta de urbanización nueva.	
iv.	Pendientes.	<p>También habrá que tomar nota de las pendientes de la zona de proyecto, ya que un valor superior al 5% puede dificultar la implantación de alguna tipología de <i>SUDS</i> y, en líneas generales, el <i>AMSS</i> se encuentra en una zona con bastante desnivel, donde las pendientes predominantes oscilan entre el 10% y 20%.</p> <p>La estimación de pendientes se realizará, para cada caso de estudio con la topografía de proyecto, en caso de que el proyecto de urbanización produzca una modificación de la superficie del terreno, habrá de contemplar además las nuevas pendientes.</p>	Generalmente, la obtención de los mapas de pendientes se puede realizar de forma sencilla a partir de las curvas de nivel en formato shapefile (.shp), empleando un software libre de <i>GIS</i> .
v.	Análisis de las posibles zonas de infiltración	Una vez conocida la geología del suelo donde se ubica el proyecto, se pueden establecer los potenciales puntos o áreas para realizar la infiltración. Para ello será necesaria que la permeabilidad en estos suelos sea como mínimo moderada-buena. Una permeabilidad baja puede afectar negativamente al funcionamiento de los <i>SUDS</i> .	Infiltrando el agua de escorrentía como sucede en el nivel predesarrollo se consigue un mayor acercamiento al <i>IHC (Impacto Hidrológico Cero)</i> .
vi.	Material geológico	Gran parte del suelo del <i>AMSS</i> se encuentra sobre tierra blanca joven y tolvas color café que, aunque tienen permeabilidades aptas para permitir la infiltración, al mojarse cambian su textura provocando problemas estructurales, por lo que sobre esos materiales no se deberá proceder a infiltrar la escorrentía.	
vii.	Suelos inclinados	<p>Si el suelo de la zona de proyecto tiene una pendiente superior al 5% (o 10%, las limitaciones de pendiente dependen del <i>SUDS</i>) en la siguiente fase de diseño habrá que incluirlo para asegurar que las velocidades de la escorrentía dentro de los sistemas de transporte se mantengan en unos límites que no produzcan erosiones ni la resuspensión de las partículas arrastradas.</p> <p>Otro riesgo que habrá que considerar es la posibilidad de que se genere una línea de manantial (Fig. 14) que brote aguas abajo.</p>	Para prevenir las líneas de manantial, habrá que analizar los datos geotécnicos de los ensayos realizados y, en caso de que el material del subsuelo pudiera conectar el agua a una salida pendiente abajo o que la circulación subterránea de la escorrentía infiltrada pueda alcanzar

	Tipo de Estudio.	Información Relevante.	Comentarios.
			<p>alguna infraestructura aguas abajo, no seleccionar un sistema de infiltración.</p> <p>Para evitar que esto suceda, no se colocarán los <i>SUDS</i> que conlleven infiltración en las coronas de los taludes, que deberán estar bien definidos en la topografía de la fase de desarrollo urbanístico.</p>
viii	Cercanía a estructuras/ edificaciones	<p>Para evitar que la infiltración cause problemas de humedades o inestabilidades en los cimientos de estructuras o edificaciones y dada la tipología del terreno en el <i>AMSS</i> la distancia mínima recomendable a cualquier estructura desde un dispositivo de infiltración será de 5 metros. $D = 5$ m. (Fig. 15)</p> <p>Aunque, para pequeñas instalaciones pueden situarse a una distancia inferior siempre que la capacidad de infiltración sea buena y se localice a una distancia mínima de cualquier estructura según tipo de suelo.</p>	<p>La distancia total al sistema de infiltración será la distancia de seguridad (x) igual a profundidad de cimientos más la distancia que corresponda según textura del suelo (d) (Cuadro 19). $D = x+d$.</p>

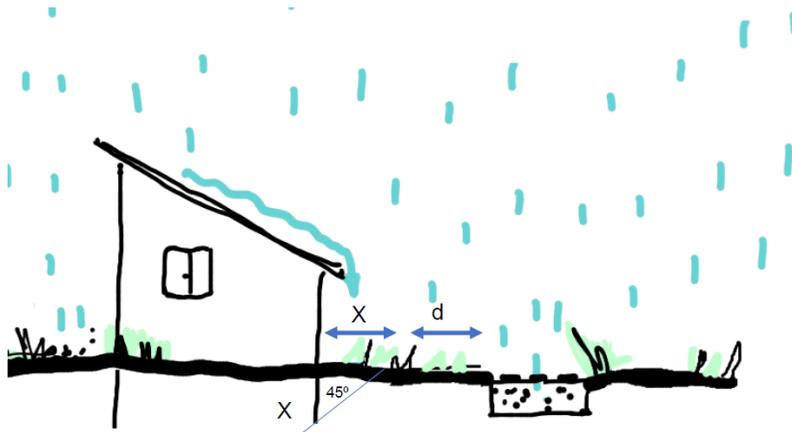
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de *SUDS* en el *AMSS*, El Salvador, año 2020, pág. 14-20.

Figura 14. Ejemplo esquematizado de una línea de manantial.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 18.

Figura 15. Distancia mínima de un sistema de infiltración a una edificación $D=x+d$.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 19.

Cuadro 19. Distancias mínimas recomendables para la infiltración.

Tipo de suelo	Distancia (d)
Arenoso y franco arenoso	1.0
Arcillo arenoso	2.0
Roca meteorizada	3.0
Arcillo limoso	No se recomienda instalación
Arcilloso	No se recomienda instalación

Fuente: OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 20.

ix. Análisis de la hidrología urbana.

Los SUDS, al igual que la red de alcantarillado convencional, se enmarcan en el drenaje secundario o micro drenaje. Es decir, no se ocupa de las inundaciones por desbordamiento de los cauces naturales o quebradas (macro drenaje). Estos se analizan desde la perspectiva de la hidráulica urbana, que estudia la hidrología de las zonas urbanas y metropolitanas, en donde predominan las superficies casi impermeables y el relieve artificial de terreno, analizando en particular el efecto del desarrollo urbano.

El proceso de transformación de lluvia a escorrentía en zona urbana presenta una serie de particularidades derivadas del tipo de medio en el que se da, el urbano. La escala espacial de estudio de las cuencas urbanas es mucho más pequeña (del orden del kilómetro cuadrado) que la de un estudio hidrológico de cuencas naturales (hectáreas). Y en su definición además de la topografía hay que considerar los puntos de entrada a la red de drenaje artificial. Otras características importantes son la alta impermeabilización del suelo y el hecho de que los diseños están pensados para la rápida evacuación de la escorrentía.

Todo ello tiene las siguientes consecuencias:

Cuadro 20. Consecuencias del proceso de transformación de lluvia a escorrentía en un medio urbano.

Consecuencia	Descripción
Aumento de la escorrentía total:	Las pérdidas por evapotranspiración, interceptación vegetal, almacenamiento superficial e infiltración no son significativas respecto a la precipitación, por lo que casi toda la lluvia se transforma en escorrentía, aumentando su volumen.
Distribución temporal más rápida:	Los pavimentos, cunetas y colectores conducen el agua más rápidamente que lo hacen las superficies naturales. Esto, sumado eventualmente a obras de rectificación y limpieza de los canales naturales, aumenta la velocidad del flujo, originando tiempos de base más cortos.
Mayores caudales y niveles pico:	Los caudales pico aumentan con la urbanización, como consecuencia de un mayor volumen escurrido en un tiempo más corto. Además, la urbanización tiene un mayor impacto sobre los eventos frecuentes que sobre los eventos extremos.
Contaminación de las masas de agua receptoras:	La contaminación presente en las aguas pluviales urbanas es una de las principales fuentes de deterioro de los cuerpos de agua receptores. Esta contaminación se debe fundamentalmente al lavado que produce la lluvia sobre los contaminantes acumulados en las superficies impermeables.

Fuente: Elaboración propia con información de OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 21.

Pluviometría:

Las principales vulnerabilidades definidas en el *AMSS* están íntimamente conectadas con los cambios previstos con el Cambio climático y se resumen en los siguientes puntos:

- **Aumento de Temperatura.**
- **Disminución de precipitación anual.**
- **Aumento de precipitación extrema.**

Las características básicas de las lluvias máximas de la región del *AMSS* pueden ser estimadas a partir del análisis de las curvas intensidad-duración-frecuencia de la estación más cercana a la zona de proyecto.

Atendiendo al reglamento vigente en el *AMSS*, el período de retorno (Tr) mínimo a emplear para el dimensionamiento de los dispositivos de control de escurrimiento pluvial es de 10 años. Se recomienda que, en caso de llevar un rebalse, éste se dimensione para un Tr mayor por motivos de seguridad. El período de retorno de un evento es la cantidad de tiempo para la cual la probabilidad de ocurrencia se distribuye uniformemente en los periodos que componen dicha cantidad de tiempo; así pues, un período de retorno de 10 años corresponde a una probabilidad de excedencia de $1/10 = 0.1$ o 10% para un año cualquiera, no debe interpretarse de forma errónea como un evento que se repite una vez cada 10 años, de hecho, la probabilidad de que se dé una o más veces en ese período es del 65%.

Otra metodología bastante común para dimensionar los SUDS es a partir del “volumen de calidad”, que es aquel que se genera a partir de la esorrentía generada por la lluvia de percentil del 80-90% de la serie de precipitaciones del año medio y se denomina así porque la gestión de ese volumen implica una reducción de la contaminación vertida hacia el medio receptor de entre el 80%-90%. Esta sistemática implica unas dimensiones menores que las desarrolladas a partir de $Tr=10$ años.

Un punto importante a tener en cuenta, en la diferencia entre el dimensionamiento de drenaje convencional y sostenible es que el primero suele dimensionarse con caudales pico (el colector, canal o conducto ha de tener capacidad suficiente para transportar hasta un caudal máximo definido a partir de las curvas IDF y un área de aportación) y el segundo con volúmenes (el agua se va almacenando en la estructura y, o se lamina o se infiltra).

Puesto que la finalidad de los SUDS es la gestión de eventos frecuentes no extremos, en la guía SUDS se propone realizar el dimensionamiento con $Tr=5$ años para sistemas de control en origen que preceden a otro sistema (con rebalse preparado para $Tr=10$) y $Tr= 10$ años para técnicas de control local y sistemas de transporte, ajustándose a la normativa de OPAMSS.

Definición de las Subcuencas o áreas de aportación:

Como cualquier análisis hidrológico previo a un dimensionamiento de una obra de drenaje, en este caso también hay que definir las cuencas de aportación. Puesto que sus particularidades son diferentes a las de las cuencas naturales, en la guía SUDS se les denomina cuencas urbanas y a cada parcela en la que se puedan dividir, áreas de aportación o áreas aportantes.

Ya se ha mencionado que las cuencas urbanas tienen una serie de características por mero hecho de su “urbanidad” que hay que considerar a la hora de delimitarlas. Respecto al tamaño, son más pequeñas que las cuencas naturales, y se pueden dividir en cuencas más pequeñas según las superficies de aportación (cubiertas, aceras, calzada). Por ello, se ha de trabajar a gran escala, ya que elementos constructivos de pequeña envergadura (bordillos, cordones-cuneta, arbolado urbano, etc.) cambian la superficie modificando las rutas que podría seguir el agua.

Para comparar más detenidamente los elementos a tener en cuenta en la delimitación de las cuencas urbanas y de las áreas de aportación, se van a considerar los dos posibles casos de partida de un proyecto:

Nueva construcción: se va a edificar sobre un suelo no urbanizado.

En este caso, con ayuda de la topografía, se delimitarán las cuencas de la superficie de proyecto, identificando puntos de vertido de cada uno y las rutas del agua. En fases de nueva construcción, es recomendable, una vez hecho esto, corroborar que no se va a construir sobre ninguno de los caminos del agua, puesto que cuanto más se respeten esas vías, menos puntos de acumulación de escorrentía no deseados aparecerán y, por lo tanto, menos elementos para evitar los problemas derivados de esa acumulación, habrá que ejecutar.

La planificación de una nueva urbanización teniendo en cuenta el ciclo hidrológico natural, minimiza su impacto desde el principio respetando, en la medida de los posibles, las vías preferenciales del agua. Esto se considera una medida no estructural de drenaje sostenible.

Suelo desarrollado urbanísticamente.

La topografía natural está modificada y el ciclo del agua ya no sigue las rutas preferenciales que le daba el suelo natural. En estos casos hay que tener en cuenta que:

- Los puntos de vertido de las áreas de aportación pueden ser elementos artificiales, como tragantes o rejillas.
- Las aguas lluvias precipitadas sobre los edificios se vierten a la calle, por donde discurre hasta que entra a una red de drenaje. De manera que puede darse el caso de que la escorrentía generada en la cubierta de un

edificio, que se considera que queda dentro de una cuenca urbana por su localización, acabe siendo vertida en otra cuenca.

- Aunque es más rápido generar las cuencas automáticamente con software GIS a partir de unos puntos de vertido o desagüe dados y de un MDT, es conveniente prestar mucha atención en ese proceso, revisarlo y, si es conveniente corregirlo. En el medio urbano hay grandes alteraciones de cotas superficiales en pequeñas extensiones. Por ejemplo, en una sección de una calle está la cota de la calzada, a tres metros la cota de la acera 15-20 cm más alta y a un par de metros más, un edificio de 10 metros de altura. En las triangulaciones del MDT se puede perder parte de esa información tan concentrada y dar como resultado cuencas urbanas que, no se ajustan con la realidad.

Los pasos para la delimitación de las subcuencas urbanas y de sus áreas de aportación se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 21. Pasos para la delimitación de subcuencas urbanas y de sus áreas de aportación.

	Paso	Descripción
1.	Definición de los caminos del agua según topografía.	El empleo de software GIS es una herramienta muy útil ya que permite visualizar simultáneamente en una misma imagen topografía, la red de tragantes y colectores, los planos catastrales y/o ortofotografías georreferenciadas.
2.	Determinación de los puntos de salida del agua.	Tanto tragantes como salidas directas.
3.	Delimitación del área aportante a cada punto de salida.	En medios urbanos, las calles generalmente actúan como canales que vierten en los tragantes. Pero no toda el agua que circula sobre el tragante o la reja logra entrar en él, parte del caudal sigue hacia aguas abajo. Esto se considerará en el siguiente paso de diseño, en la creación del modelo conceptual.
4.	Clasificar las áreas aportantes de las subcuencas urbanas.	La delimitación de las áreas aportantes para proyectos SUDS, ha de discretizarse lo máximo posible, según sus categorías comunes unificadas. Por ejemplo, las áreas aportantes de una subcuenca urbana pueden ser: la calzada, los arriates, las cubiertas de los edificios o la acera.

Fuente: Elaboración propia con información de OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 24.

Para finalizar, es necesario realizar las visitas a campo que se requieran para verificar las cuencas urbanas delimitadas y modificar éstas últimas para ajustarlas a lo observado “in situ”.

Cálculo de caudales:

La metodología para el cálculo de los caudales de diseño viene establecida en la norma RLDOT del AMSS y es función del tamaño del área de proyecto:

1. Para áreas de drenaje con una extensión de hasta dos y medio kilómetros cuadrados se podrá utilizar el Método Racional, considerando como coeficientes de escorrentía para cada tipo de uso de suelo:

Cuadro 22. Coeficientes de escorrentía para el cálculo de caudales.

ÁREAS URBANAS: Uso de suelo	Coeficientes de escorrentía
Comercio	0.70 - 0.95
Residencial alta densidad	0.65 - 0.80
Residencial media densidad	0.40 - 0.60
Residencial baja densidad	0.30 - 0.50
Industrial más del 70% impermeable	0.60 - 0.90
Industrial hasta el 70% impermeable	0.50 - 0.80
Parques y Cementerios	0.10 - 0.25
Parqueos Concreto	0.70 - 0.95
Parqueos Asfalto	0.80 - 0.95
Áreas Peatonales	0.75 - 0.85
Techos	0.75 - 0.95

Fuente: OPAMSS, Capítulo 4, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 25.

Este método presenta una serie de limitaciones que el proyectista deberá tener en cuenta:

- Proporciona solamente un caudal pico, no el hidrograma de crecientes para el diseño.
- Supone que la lluvia es uniforme en el tiempo y en toda el área de la cuenca, con una intensidad constante, lo cual es sólo cierto cuando la duración de la lluvia es muy corta y si la extensión de la cuenca es pequeña.

- Asume que la escorrentía es directamente proporcional a la precipitación, y esto no es cierto en la realidad, ya que la escorrentía depende también de muchos otros factores, tales como precipitaciones antecedentes, condiciones de humedad antecedente del suelo, etc.
- Ignora los efectos de almacenamiento o retención temporal del agua escurrida en la superficie, cauces, conductos y otros elementos ya sean naturales o artificiales.
- Admite que el período de retorno de la precipitación y el de la escorrentía son los mismos, lo que sería cierto en áreas impermeables (donde las condiciones de humedad antecedente del suelo no influyen de forma significativa en la escorrentía superficial) pero no en suelos de elevada permeabilidad.

Pese a esto, el método racional se usa prácticamente en todos los proyectos de drenaje urbano en todo el mundo ya que produce resultados aceptables en áreas pequeñas y con alto porcentaje de impermeabilidad, cómo será el caso de las áreas de aportación de las Subcuencas urbanas.

De todas formas, aunque se haga una primera estimación de caudales con este método para el dimensionamiento de los *SUDS*, en la fase 3 de diseño se deberá comprobar el funcionamiento global del conjunto de la cadena de gestión mediante modelos de simulación hidrológica-hidráulica.

2. Para áreas de drenaje mayores de dos y medio kilómetros cuadrados se deberá utilizar Métodos Hidrometeorológicos debidamente justificados. Estos métodos se suelen emplear más para cuencas naturales, ya que contemplan con más detalle la permeabilidad del suelo, su capacidad de almacenamiento de agua. Por eso, en aquellos nuevos desarrollos, donde se parte de suelos naturales, es más adecuado el empleo de este tipo de

métodos, de esta manera no se sobreestimaré el caudal generado evitando el sobredimensionamiento de los elementos de drenaje.

Localizaciones puntuales

Aunque sea más sencillo incluir los SUDS en un proyecto desde su fase inicial, éstos también pueden incorporarse a edificaciones ya construidas y en uso.

Al tratarse de una remodelación, en caso de que no se superen los 50 m² de intervención y, aplicando el “Art. VIII. 4. Obras Autorizadas sin Solicitud Previa” del RLDOT AMSS, no se requerirá solicitar el permiso de Factibilidad.

Esto puede aplicar a SUDS de control en origen que se realicen en una edificación ya existente. Pero se debe tener en cuenta que, de estar localizados en el jardín exterior, deberá respetarse el alineamiento en lo relativo a acera, arriate, rodaje y zonas de retiro en caso de vías de circulación mayor, para lo cual se deberá realizar el trámite de Línea de Construcción correspondiente.

2.6.3 Fase 2: Creación de un modelo conceptual (La Cadena de Drenaje.

Antes de proseguir con la siguiente fase de diseño, es necesaria la de creación de un modelo conceptual, ya que conviene profundizar en las diferentes aplicaciones que pueden realizarse dentro de un SUDS. De esta manera, dadas las necesidades a cubrir por el proyecto se seleccionarán aquellos sistemas cuya función sea la que mejor se alinee con el cumplimiento de los objetivos de proyecto.

a. Los sistemas de gestión sostenible de aguas lluvia.

Los sistemas que contempla la guía SUDS son:

- i. Sistemas no estructurales.
- ii. Sistemas de recolección de aguas pluviales.
- iii. Sistemas de superficies permeables.
- iv. Sistemas de almacenamiento.
- v. Sistemas de infiltración.
- vi. Sistemas de transporte.
- vii. Sistemas de tratamiento.

Es importante conocer más detalles y características sobre los sistemas o técnicas SUDS para continuar con la siguiente etapa (Cadena de Drenaje), por lo que se muestra a continuación un cuadro en donde se sintetiza la información relevante de cada sistema.

Cuadro 23. Sistemas de Gestión sostenible de agua lluvia.

	Tipo de Sistema.	Información relevante.	Comentarios.
i.	Sistemas no estructurales.	<p>Su principal característica es que son de tipo preventivo y no requieren construcción de elementos.</p> <p>Suponen el primer eslabón de la cadena de drenaje e incorpora una multitud variada de acciones cuya finalidad es evitar que aparezcan problemas de acumulación de agua de escorrentía en puntos indeseados o su contaminación.</p>	<p>Algunas actuaciones concretas para iniciar el tren de drenaje podrían ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nuevos desarrollos urbanísticos: <ul style="list-style-type: none"> o Respetando los caminos preferentes del agua. o Aprovechar esos caminos naturales para la conducción segura del excedente de caudal. o Manteniendo las zonas de potencial infiltración para ese uso. o Acondicionar un porcentaje del suelo como espacio verde recreativo. (Normado). o Aprovechando las depresiones naturales para el almacenamiento de la escorrentía. - Remodelaciones del espacio urbano desarrollado: <ul style="list-style-type: none"> o Reparar y acondicionar tragantes. o Retirar basuras y escombros.
ii.	Sistemas de recolección de aguas pluviales.	<p>Son sistemas que capturan el agua de lluvia y facilitan su uso dentro de un edificio o el entorno local. Su tamaño y material de construcción dependerá de la cantidad de agua a recolectar y su posterior uso.</p> <p>El dimensionamiento del depósito de pluviales depende de 3 factores principalmente: la superficie disponible de captación de lluvia, la demanda de agua a satisfacer y la precipitación media de la zona, a los que hay que añadir las limitaciones espaciales y económicas y, en el caso del AMSS, la temporalidad de las precipitaciones.</p>	<p>Se pueden emplear barriles de madera correctamente tratados, depósitos de material plástico o depósitos de material constructivo.</p> <p>Una metodología simplificada de apreciación del volumen requerido es:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estimar el volumen de agua que se puede recoger anualmente. (Ec. 1) 2. Estimar el gasto anual de aguas lluvias. (volumen de agua que se va a gastar) 3. Comparar ambos volúmenes estimados anteriormente.

	Tipo de Sistema.	Información relevante.	Comentarios.
		<p>En la aplicación de estos sistemas en el AMSS como elementos del drenaje habrá que tener en cuenta:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se dimensionan en función de precipitaciones medias, no de máximas. 2. La estacionalidad de las precipitaciones. 3. Al estar tan polarizada la precipitación en el AMSS, pueden ocurrir dos casos: <ol style="list-style-type: none"> a. Que el sistema esté funcionando para captar y abastecer en época lluviosa. b. Que el sistema sólo esté almacenando agua en época de lluvias para después abastecer en época seca. 	<p>4. A partir de los días que transcurren entre lluvias, determinar el volumen del depósito. (Ec.2)</p> <p>En el primer caso (a) el volumen disponible para laminar será inferior, ya que siempre ha de haber un volumen mínimo de agua dentro del sistema para el abastecimiento. En el segundo caso (b), al principio de la temporada de lluvias se dispondrá del volumen completo del sistema, que se irá reduciendo conforme vayan avanzando los meses</p>
		Parámetros a estimar y/o calcular:	Ecuación y Descripción:
		$Vol = A \times P \times C$ <p style="text-align: center;">Ec. 1</p>	<p>C: Coeficiente de rendimiento, es función del tipo de superficie:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Techo duro inclinado 0.8 ○ Techo plano sin gravilla 0.8 ○ Techo plano con gravilla 0.6 ○ Techo verde intensivo 0.3 ○ Techo verde extensivo 0.5 ○ Superficie empedrada/superficie con empedrado compuesto 0.5
		$Vol = \frac{Vol. \text{ anual a emplear} \times \text{Días}}{365}$ <p style="text-align: center;">Ec. 2</p>	
iii.	Sistemas de superficies permeables.	Las superficies permeables son un conjunto heterogéneo de superficies que permiten el paso del agua a su través (Pavimentos Permeables). Pueden ser asfaltos porosos, módulos	A la hora de realizar el diseño habrá que tener en cuenta las diferentes características de cada una de ellas antes de proceder a su comprobación hidráulica, ya que sus capacidades permeables

	Tipo de Sistema.	Información relevante.	Comentarios.
		<p>impermeables cuyas juntas no están selladas, módulos ornamentales con grama.</p> <p>El diseño de este tipo de elementos se divide en dos, la parte estructural (no es objeto de la guía <i>SUDS</i>) y la parte hidráulica, para lo que se necesita saber la conductividad hidráulica, la porosidad de la superficie, el porcentaje de área impermeable (cuando se trata de superficies permeables discontinuas o modulares), la relación de vacíos y la pendiente.</p>	<p>varían. Pero en todos los casos la conductividad hidráulica ha de ser alta.</p> <p>Por muy permeable que sea la superficie, si se sitúa en un medio de pendiente superior al 5% (aparte de los problemas estructurales que puedan surgir), será difícil que percole el agua porque escurrirá rápidamente. En esos casos se recomienda reducir la pendiente hasta un máximo del 2%.</p> <p>Aunque en el seno de la misma superficie se pudiera acumular agua, el almacenamiento queda relegado a las capas inferiores que se localizan específicamente para ello por varios motivos, a nivel estructural e hidráulico.</p>
iv.	Sistemas de almacenamiento.	<p>Se tratan de sistemas que aportan un volumen donde se almacena el agua de escorrentía para su posterior salida. La tipología de estos sistemas es muy amplia, según su localización pueden ser: superficiales, subterráneos o una combinación; según la forma de almacenamiento, un espacio hueco, una matriz porosa o ambos simultáneamente.</p> <p><i>Almacenamiento en matriz porosa.</i></p> <p>Ejemplos de <i>SUDS</i> que almacenan agua en matriz porosa son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de Biorretención. - Zanjas y pozos de infiltración. - Depósitos subterráneos de celdas plásticas. <p>En estos tres casos la escorrentía puede salir por infiltración, por un dren o colector o por ambos medios.</p>	<p>Para simplificar el dimensionamiento en esta fase de modelo conceptual, se van a considerar dos grupos.</p> <ul style="list-style-type: none"> -<i>Almacenamiento en matriz porosa.</i> -<i>Almacenamiento en espacio libre.</i> <p>En el diseño de estos sistemas hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Caudales de entrada (m^3/s) para $T_r=5$ o 10 años según la localización del sistema dentro de la cadena de drenaje y duración de 1 hora. Con ello se obtiene un volumen de entrada (V_E, m^3). - Caudal de salida (m^3/s). El caudal de salida (V_S, m^3) puede darse por:

Tipo de Sistema.	Información relevante.	Comentarios.	
		<ul style="list-style-type: none"> • La infiltración, en cuyo caso hay que estimar el volumen de agua exfiltrado (V_s) durante un período de tiempo determinado (24 horas). • Un dren o colector que transporte la escorrentía inmersa en la matriz hacia el exterior. • Ambos medios. 	
	Parámetros a estimar y/o calcular:	Ecuación y Descripción:	
	Conductividad hidráulica de la matriz porosa (k , m/h):	Es la velocidad a la que el agua circula a través del lecho.	
	Tiempo de vaciado del sistema (t , s):	Es el tiempo que tarda el sistema en estar completamente disponible para la siguiente tormenta. (lo ideal es 24 horas)	
	Volumen de almacenamiento útil (V_A , m^3):	$V_A = V_E - V_S$ Ec. 3.	Es el volumen disponible en el sistema, siendo la diferencia del volumen entrante y el saliente. Será el proyectista el que defina el caudal de salida en función de las condiciones aguas abajo, una vez determinado ese caudal.
	Volumen de almacenamiento total (V_T , m^3):	$V_T = V_A/k$ Ec. 4	Es el volumen total del sistema. Equivale al V_A dividido por la porosidad del sistema (0.3-0.4 si el sistema contiene gravas o 0.9 si está formado por celdas plásticas).
	Área de la matriz porosa (A_S , m^2):	$A_S = \frac{V_E \cdot L}{k(h + L)t}$ Ec. 5	Una vez conocido el volumen a gestionar, para asegurar unas dimensiones que permitan que el sistema se vacíe en 24 horas, ha de cumplirse:
	<i>Almacenamiento en espacio libre.</i>		
	El almacenamiento en espacios libre puede darse a cielo abierto como en los estanques de retención o en sistemas subterráneos como los depósitos de	Estos sistemas se emplean generalmente para gestionar la escorrentía a nivel local o regional por lo que la tormenta de diseño se corresponderá con un	

	Tipo de Sistema.	Información relevante.	Comentarios.
		<p>detención y, generalmente, en ellos no se da el proceso de infiltración.</p>	<p>periodo de retorno mínimo de 10 años y se vacían en las 24 horas posteriores a la tormenta para volver a tener capacidad para el siguiente evento pluviométrico.</p>
		<p>En estos casos, el volumen de almacenamiento útil y el total es el mismo y su estimación puede realizarse de forma sencilla mediante un balance de masas.</p>	<p>El balance de masas tiene en cuenta:</p> <ul style="list-style-type: none"> - El caudal de entrada (m³/s), que es el generado por una tormenta de diseño de T_r=10 años y de una hora de duración (a menos que desde OPAMSS se indique otra cosa). - El caudal de salida (m³/s), que viene determinado por el tiempo de vaciado (24 horas máximo) y por el dispositivo (colector, válvula, vertedero...) por el que sale el flujo, que a su vez dependerá también de las condiciones aguas abajo. El caudal de salida, lo define OPAMSS en el trámite de <i>Factibilidad de Aguas Lluvia</i> velando siempre por el <i>IHC</i>, a menos de que se trate de un sistema intermedio dentro de la cadena de drenaje.
v.	Sistemas de infiltración.	<p>Estos sistemas facilitan la percolación del agua de lluvia en el subsuelo, para ello disponen de un volumen (un medio poroso o celdas plásticas) donde se almacena agua de escorrentía que se irá infiltrando en el subsuelo.</p>	
		<p>Parámetros a estimar y/o calcular:</p>	<p>Ecuación y Descripción:</p>
		<p>Volumen de aguas lluvias a tratar (V_E, m³):</p>	<p>Es el volumen de agua generado por una superficie de aportación determinada para T_r=5 o 10 años (ver Paso 1: Estudio del terreno) según la localización del sistema dentro de la cadena de drenaje y duración 1 hora, más el precipitado directamente sobre el sistema (si está a cielo abierto).</p>

	Tipo de Sistema.	Información relevante.	Comentarios.
		Permeabilidad del suelo (k, m/h):	<p>Es la velocidad con la que el agua se infiltra en el suelo, el valor mínimo del suelo donde se va a realizar la infiltración es de $4 \cdot 10^{-6}$ m/h.</p> <p>Es importante que la permeabilidad del subsuelo permita que el agua almacenada en el sistema penetre por completo en él en las 24 horas posteriores a la tormenta.</p> <p>En esta fase de creación del modelo conceptual basta con conocer el material del subsuelo según lo determinado en la fase previa de caracterización de la zona de estudio para estimar un coeficiente de permeabilidad.</p> <p>En la siguiente fase, la de proyecto, sí que habrá que contar con los valores hallados en los ensayos en campo</p> <p>Al valor de la permeabilidad, habrá que aplicarle un factor de seguridad C_s que considera las posibles colmataciones del suelo por la deposición de las partículas arrastradas por la escorrentía. Cuadro 24.</p>
		Volumen de infiltración (V_I , m ³):	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> $V_I(t) = C_s \cdot k \cdot A_I \cdot T$ <p style="text-align: center;"><i>Ec. 6</i></p> </div> <div style="flex: 1; padding-left: 10px;"> <p>Volumen de agua que puede infiltrarse en el subsuelo.</p> </div> </div>
		Volumen de almacenamiento útil (V_A , m ³):	<p>Es el volumen disponible en el sistema, se puede estimar como la máxima diferencia entre el volumen de escorrentía (V_E) y el volumen acumulado infiltrado (V_I), pero en la guía <i>SUDS</i> se recomienda que el volumen de almacenamiento sea igual al de escorrentía por la torrencialidad de las precipitaciones en el <i>AMSS</i>. (ósea $V_A = V_E$)</p> <p>El punto de partida del diseño es comprobar que $V_I > V_A$. Si no es así, sólo se podrá infiltrar un volumen igual a V_I y la diferencia $V_I - V_A$ habrá que conducirla de forma segura hacia otro sistema o hacia otra localización donde se pueda infiltrar.</p>

	Tipo de Sistema.	Información relevante.		Comentarios.
		Volumen de almacenamiento total (V_T , m ³):	$V_T = V_A \cdot e$ Ec.7	Es el volumen total del sistema. En los sistemas de infiltración superficiales, el volumen útil se corresponde con el total. En los sistemas de infiltración subterráneos el volumen total será el V_A multiplicado por la porosidad del sistema (0.3 a 0.4 sistema con gravas o 0.9 si está formado por celdas plásticas).
		A_I área total de infiltración del sistema (m ²):		Es el área total que está en contacto directo con el suelo o subsuelo por donde se producirá la exfiltración. Los sistemas superficiales de infiltración se consideran planos, es decir la infiltración se da en un solo plano. Los sistemas de infiltración subterráneos, por el contrario, se consideran tridimensionales, se produce la exfiltración tanto por el fondo del sistema como por los laterales. Tiempo máx. en el que se tiene que vaciar el sistema son 24 h.
vi.	Sistemas de transporte.	El agua se puede trasladar de un sistema a otro por conducciones de las denominadas “tradicionales” como las tuberías, cordones cunetas o canalizaciones y también por sistemas “verdes” como las cunetas verdes o las franjas filtrantes.		Su dimensionamiento hidráulico puede realizarse de forma sencilla empleando la ecuación de Manning a partir del caudal a transportar que será la suma del caudal que sale de un sistema previo más el que pueda entrar directamente a él desde zonas adyacentes. Conocidos los caudales a transportar se dimensionarán estos sistemas procurando siempre que la velocidad del flujo sea lo suficientemente baja como para que se puedan precipitar los sedimentos que queden en la escorrentía.
vii.	Sistemas de tratamiento.	Una cualidad más importantes de los <i>SUDS</i> , y esencial diferencia con los sistemas de drenaje urbano convencionales, es su capacidad de retener y/o eliminar elementos contaminantes de las aguas de escorrentía.		En el Cuadro 25 se muestran las capacidades de remoción de los principales contaminantes del agua de escorrentía en cada una de las técnicas.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 5, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 2-13.

Cuadro 24. Valores del factor de seguridad.

Caudal entrante de buena calidad.	Con pretratamiento y mantenimiento	1
	Con pretratamiento, pero sin mantenimiento	0.75
	Sin pretratamiento, pero con mantenimiento	0.75
	Sin pretratamiento ni mantenimiento	0.50
Caudal entrante de mala calidad.	Con pretratamiento y mantenimiento	0.50
	Con pretratamiento, pero sin mantenimiento	0.33
	Sin pretratamiento	0

Fuente: OPAMSS, Capítulo 5, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 10.

Cuadro 25. Capacidades en el tratamiento de los contaminantes de cada técnica

SUDS	Contaminantes						
	Sedimentos	Nutrientes	Basura	Metales	Bacterias	Aceites y grasas	Materia orgánica
Áreas biorretención	Alta	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Cubiertas verdes	Alta	Media	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cunetas verdes	Media	Baja	Baja	Media	Baja	Media	Media
Depósitos subterráneos de detención	Media	Baja	Media	Baja	Baja	Baja	Baja
Depósitos para recolección y reúso de aguas lluvia	Media	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Lagunas de infiltración	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Estanques de laminación	Media	Baja	Alta	Media	Media	Media	Media
Franjas Filtrantes	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Alta	Media
Pozos de infiltración	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Superficies permeables	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Zanjas de infiltración	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

Fuente: OPAMSS, Capítulo 5, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 13.

b. Establecimiento de una Cadena de Drenaje.

Al momento de seleccionar aquellos sistemas que ayudarán a lograr el objetivo de proyecto, hay que tener en cuenta las características de la zona de proyecto que se han analizado en la Fase 1, puesto que servirán como guía para la selección de las medidas más apropiadas, ya que no todas las técnicas de drenaje sostenible son adecuadas para todos los espacios. Es por eso, que durante la primera fase del diseño de un sistema de drenaje se identifiquen las oportunidades y limitaciones que ofrece cada lugar para crear una cadena de gestión ajustada a las particularidades espaciales de cada proyecto.

La cadena de drenaje engloba una secuencia de sistemas de gestión que tratan de imitar el Ciclo hidrológico natural desde que cae la precipitación en un punto hasta que se vierte en el medio receptor.

Este concepto es fundamental para el diseño de los SUDS, trata de cómo se emplean estos sistemas de forma encadenada con el objetivo de reducir progresivamente los volúmenes de escorrentía y/o los caudales punta y la contaminación arrastrada. Se comienza por tratar de gestionar el agua de lluvia donde precipita, para ir ampliando el campo de actuación según sea necesario.

Cuadro 26. Establecimiento de una cadena de drenaje.

	Eslabón.	Información Relevante	Comentarios.
i.	Eslabón 1: Prevención	<p>El primer Eslabón consiste en adoptar medidas de prevención, que suelen ser medidas no estructurales.</p> <p>Generalmente, sólo con la adopción de este de medidas no se suelen alcanzar los objetivos de diseño, por lo hay que pasar al siguiente eslabón, el control en origen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar construir sobre cauces o riberas susceptibles de inundarse atendiendo a lo establecido en el Art.V.13. Zonas de Protección para Accidentes Naturales del “RLDOT” y alejar la construcción del cauce o zona inundable. - Mantener limpios los tragantes para favorecer la entrada de la escorrentía que circula por la calle y cambiar el tipo de reja por otra de más luz allá donde se observe que no cumplen su función.
ii.	Eslabón 2: Control en origen	<p>Este tipo de control supone gestionar el agua de lluvia en el mismo lugar donde se genera, para impedir o minimizar la generación de escorrentía.</p> <p>Con los SUDS se tratará, en la medida de los posible que el agua se retenga o se infiltre allá donde precipite.</p> <p>Hay que definir las áreas aportantes de las cuencas urbanas, calcular el volumen que una tormenta de diseño de 5 o 10 años de periodo de retorno y 1 hora de duración produce para cada una de ellas y, seleccionar el o los <i>SUDS</i> capaces de tratar ese volumen en su globalidad.</p> <p>Lo ideal sería que también tuviesen capacidad para controlar los caudales de diseño para una tormenta de 10 años de T_r, pero como requeriría de más espacio, en caso de que no tuviera cabida, se deberá diseñar una salida segura para ese excedente de agua</p>	<p><i>SUDS</i> de aplicación en origen son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cubiertas verdes. - Pavimentos permeables. - Franjas filtrantes. - Depósitos de lluvia. - Sistemas de biorretención. - Pozos-zanjas de infiltración. <p>Ejemplos de acciones para el control en origen serían:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Instalar pavimento permeable en zona de parqueo. - Recolectar el agua de un techo para su posterior empleo en el riego. - Introducir el agua de una cubierta en un pequeño pozo de infiltración en el patio trasero. - Infiltrar el agua de una pequeña plaza en una zanja.

	Eslabón.	Información Relevante	Comentarios.
			<ul style="list-style-type: none"> - Retener el agua precipitada sobre la cubierta en un canal con bajantes reducidas.
iii	<p>Sistemas de Transporte (De un Eslabón a otro).</p>	<p>Habrá que analizar qué excedentes de caudal se generan y cómo llevarlos al siguiente eslabón de la cadena. Para ello habrá que seleccionar qué sistemas de transporte de caudal (convencionales o sostenibles) emplear en función de la topografía del terreno y la disponibilidad de espacio.</p> <p>En el diseño del dimensionamiento de estos sistemas hay que considerar que van al aire libre y que les puede entrar escorrentía de las zonas adyacentes. Ese aporte externo hay que contabilizarlo y, al no ser ya un control en origen, se hará la estimación de caudales para un periodo de retorno de 10 años.</p>	<p>Ejemplos de <i>SUDS</i> que permiten transportar caudales son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cunetas verdes. - Franjas filtrantes. - Zanjas. - Sistemas de biorretención lineales. <p>Los dos últimos son además sistemas de almacenamiento, y en todos también se puede producir la infiltración si la litología del suelo lo permite.</p> <p>En la Fase 1 se definen las posibles rutas o caminos que seguirá el agua de forma natural. Estos caminos se pueden reconvertir en sistemas de conducción sostenible aprovechando así la topografía para minimizar las excavaciones, pero siempre atendiendo a las pendientes y la litología del terreno.</p>
iv	<p>Eslabón 3: Control Local.</p>	<p>Esto es, el manejo del agua precipitada que no se ha podido gestionar en el eslabón anterior porque las técnicas no tenían capacidad suficiente o porque no se ha instalado ninguna técnica. Conocidos los excedentes de los sistemas de control en origen y los caudales de diseño para una tormenta de 10 años y una hora de duración producidos en las áreas aportantes donde no se pudo realizar el control local, se pueden dimensionar este tipo de sistemas.</p>	<p><i>SUDS</i> que pueden actuar a nivel de control local son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pozos, zanjas y lagunas de infiltración. - Depósitos enterrados de detención. - Sistemas de biorretención. - Pequeñas lagunas de laminación.

	Eslabón.	Información Relevante	Comentarios.
V.	Eslabón 4: Control Regional	El último eslabón de la cadena es el control de la hidrología urbana un nivel mayor. La escorrentía que no haya podido gestionarse mediante los eslabones anteriores se dirigirá a un <i>SUDS</i> capaz de manejar volúmenes de agua mayores.	<i>SUDS</i> capaz de manejar volúmenes de agua mayores: <ul style="list-style-type: none"> - Depósitos enterrados de detención. - Lagunas de laminación.
		En esta segunda fase de creación del modelo conceptual bastará con hacer una primera estimación de los volúmenes necesarios a almacenar y de los caudales de salida y entrada de manera que queden dimensionados como mínimo para tormentas de periodo de retorno de 10 años, aunque la Administración Pública podría definir un periodo de retorno mayor si así lo considera por motivos de seguridad.	El modelo conceptual se acompaña de un primer dimensionamiento de los sistemas presentes en cada eslabón que debe revisarse para comprobar que las dimensiones estimadas tienen cabida en el espacio de proyecto y que cumplen con los criterios de establecidos en el <i>Reglamento de OPAMSS</i> .
		Una vez hecha la selección de las técnicas que mejor se adaptan a los criterios de diseño, debe ajustarse el proceso.	Revisando: <ul style="list-style-type: none"> - Cada eslabón de la cadena y sus conexiones entre sí. - La utilidad de cada sistema dentro de la cadena. - Su posible agrupación. - La sustitución o incluso eliminación de alguno manteniendo un nivel de satisfacción óptimo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 5, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 14-18.

Fig. 16. Resumen de la Cadena de Drenaje.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 5, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 19.

c. Optimización de la Cadena de Gestión.

Tras la creación la Cadena de Drenaje, es conveniente revisarla. En el diseño y selección de un conjunto de SUDS, no hay una solución única, se pueden escoger entre diferentes sistemas con un mismo resultado final, pero es conveniente optimizar la selección de los Sistemas de drenaje con objeto de reducir las obras a ejecutar y los costos de construcción y mantenimiento e incrementar el valor paisajístico de la urbanización.

Es recomendable establecer como prioritarios los Sistemas de gestión que actúan aguas arriba frente a los que los hacen aguas abajo. Las aguas pluviales deben ser tratadas en su origen siempre que es posible y solamente los caudales más altos se deben pasar hacia las aguas abajo. También es aconsejable aprovechar aquellos elementos ya existentes que puedan servir como almacenamiento como por ejemplo espacios públicos abiertos, parqueos, o transporte de la escorrentía, por ejemplo, cauces o vaguadas o tramos existentes de una red de drenaje ya construida. Pero, en este último caso hay que tener en cuenta que en el AMSS, el microdrenaje no cuenta con capacidad hidráulica suficiente, por lo que en la Cadena de gestión se ha de potenciar los SUDS, que eviten un incremento de caudal dentro de la red existente.

d. Resultados obtenidos en la primera mitad del Proceso de diseño.

En este punto ya se ha alcanzado la mitad del Proceso de diseño; tras la caracterización de la zona de proyecto y la creación de un modelo conceptual siguiendo la Cadena de gestión de drenaje sostenible, por lo que, es importante tener claros los siguientes puntos listados antes de continuar con el diseño:

- **El objetivo del proyecto**, que puede ser evitar al máximo la escorrentía, apoyar la red de drenaje existente, aprovechar un espacio verde como elemento de control de pluviales y otros.

- **Las áreas (de existir)** dónde puede llevarse a cabo la infiltración, como han de consultarse mapas Lito-geológicos, en una primera estimación de la capacidad de infiltrar del suelo se podrá recurrir a la bibliografía. Para la siguiente fase de diseño el desarrollista o empresa desarrolladora deberá realizar los ensayos específicos del sitio para conocer si se puede o no infiltrar.
- **Las pendientes**, puesto que es un factor limitante será conveniente analizar las pendientes y categorizarlas en intervalos de 0 a 5%, de 5% a 15% y mayores del 15% que será donde se descartará el uso de gran parte de los SUDS.
- **Las zonas de riesgo** por deslizamiento de laderas y/o inundación derivada del desbordamiento de río o quebrada.
- En caso de tratarse de una **zona ya urbanizada**, los espacios aptos en convertirse en SUDS superficiales y aquellos puntos donde se pueda excavar para instalar sistemas de almacenamiento subterráneos.
- **La tipología de usos del suelo**, puesto que de tratarse de una zona susceptible de contaminar la escorrentía habrá que tomar precauciones especiales en función de la tipología de contaminantes que se espera puedan aparecer.
- **Las rutas o caminos** que sigue la escorrentía y los posibles puntos de vertido. Las rutas de excedencia de un eslabón a otro pueden incluir caminos, partes de espacios públicos abiertos, ha de asegurarse siempre que su uso para este propósito no impida su función normal ni ponga en riesgo a las personas o sus bienes.
- **Las cuencas urbanas** discretizadas en áreas de aportación y los caudales y/o volúmenes generados en cada una de las áreas de aportación.
- **Las técnicas** que pueden emplearse en cada nivel de gestión y un predimensionamiento de las mismas a partir de los volúmenes de escorrentía. Aunque las dimensiones pueden variar antes de proceder al diseño detallado,

al llegar a la mitad de este proceso ya hay que saber en los elementos que serán necesarios instalar, dónde y su envergadura aproximada para hacer una apreciación de los costes y de las potenciales tareas de mantenimiento. El predimensionamiento puede realizarse con un balance de masas (metodología en primer epígrafe: Los sistemas de gestión de aguas de lluvia).

- **Estimación del volumen** de tierras a movilizar y de los costos de construcción, de los sistemas propuestos.

El modelo conceptual será la base del proyecto, por lo que cuanto mejor y más detallado se tengan desarrollados los puntos antes mencionados, más sencillo será realizar el diseño de proyecto SUDS.

2.6.4 Fase 3: El proyecto SUDS.

Esta fase comienza a partir del modelo conceptual establecido en la fase anterior donde se han definido los caudales a gestionar, las rutas que seguirá la escorrentía, los puntos de vertido, los volúmenes a retener y/o infiltrar en cada localización y se han seleccionado los sistemas que se emplearán para ello.

El proceso de diseño no es lineal, sino que se retroalimenta conforme se va analizando el comportamiento hidrológico/hidráulico de cada componente. Puede ser que la propuesta del modelo conceptual sea válida pero que una vez definidos todos los elementos necesarios, éstos no tengan cabida en el proyecto o que, cuando se obtengan las tasas de infiltración medidas in situ, éstas definan otras dimensiones para los dispositivos propuestos. Entonces habrá que redefinir las rutas del agua, proponer otros sistemas de gestión de la escorrentía y redimensionarlos. Todas las suposiciones hechas en la etapa de diseño conceptual, como las capacidades de infiltración, los niveles piezométricos, las infraestructuras y capacidades de alcantarillado existentes, deben confirmarse in situ.

Al comienzo de esta etapa, todos los datos y parámetros necesarios (ver Fase I: Caracterización) han de estar perfectamente definidos, puesto que se van a dimensionar los elementos (sistemas y dispositivos adicionales) al detalle:

- Topográfico a escala 1:100.
- Tasas de infiltración reales.
- Catastro (planos a escala 1:1000 mínima con la localización de infraestructuras, tendido eléctrico, postes de teléfono, tragantes, alcantarillado...).
- Limitaciones espaciales que pudieran existir: colindancias con los vecinos, disposiciones específicas de cada municipalidad.
- Áreas aportantes y el punto de salida de estas.
- Caudales y volúmenes de esorrentía.
- Y, en caso de que haya propuestas de recolección de pluviales, cantidades de consumo previstas.

a. Paso 1: Comprobación hidrológica e hidráulica de cada sistema propuesto considerando los requerimientos a la entrada y a la salida de cada uno de ellos.

Una vez estimados los volúmenes de infiltración y/o almacenamiento en cada sistema, hay que analizar cómo el flujo de agua entra en él, cómo discurre a su través y como sale.

i. Entrada al sistema.

El mecanismo por el cual se recolectan las aguas pluviales y se envían a un *SUDS* varía, dependiendo del tipo de sistema que se trate, la topografía y las rutas de flujo.

Cuadro 27. Dimensionamiento y características para entradas de sistemas SUDS.

Tipo de entrada	Características	Dimensionamiento
Entradas puntuales.	<p>Los principales componentes son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Un conducto de entrada (canal o tubo) con capacidad para transportar el caudal de entrada. - Un elemento para la protección del conducto de entrada. - Un dissipador de la energía del flujo de entrada, para evitar que altas velocidades pueden causar erosiones dañando la superficie del SUDS (por ejemplo, una franja de grava o mampostería). - Un difusor de flujo para evitar que el agua se concentre y discurra sólo por una parte del SUDS (como puede ser una berma por la que el agua rebose por igual). 	$V = \left(\frac{A}{P}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{I^{0.5}}{n}\right)$ <ul style="list-style-type: none"> - V: Velocidad media de flujo (m/s) - A: Área de la sección del flujo (m²) - P: Perímetro mojado (m) - I: Pendiente longitudinal de la calle (m/m) - n: Coeficiente de rugosidad de la superficie
Entradas lineales.	<p>Este tipo de entradas se da cuando el agua entra en lámina al SUDS a través de uno de sus laterales y es la indicada para que en los sistemas con una morfología lineal (cunetas verdes o zanjas de infiltración) distribuyen el flujo por toda la superficie del SUDS de forma homogénea.</p>	$V = \left(\frac{A}{P}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{I^{0.5}}{n}\right)$
Entradas mixtas.	<p>Los bordillos son elementos de protección en calles y carreteras, dificultan la intromisión de los vehículos en las aceras y que los peatones ingresen en los arriates. Modificando los bordillos, se puede mantener su función de seguridad vial a la vez que se permite la entrada del caudal desde una zona impermeable (calzada o carretera) hacia un SUDS que no requiera pretratamiento</p>	<p>El dimensionamiento de las aberturas se puede realizar de una forma relativamente sencilla conociendo el caudal de diseño del SUDS y simulando la entrada como un vertedero lateral en el cordón cuneta.</p> $Q = C_w \cdot L \cdot h^{5/3}$ <ul style="list-style-type: none"> - C_w: Coeficiente de descarga del <p><i>Ec.9. Caudal entrante por abertura en bordillo.</i></p> <p>vertedero.</p> <ul style="list-style-type: none"> - L: Longitud del vertedero.

Tipo de entrada	Características	Dimensionamiento
		- h : Diferencia de alturas en el vertedero.
Pretratamientos.	El objetivo de estos elementos es reducir la velocidad de entrada de la escorrentía para evitar que se produzcan erosiones dentro del sistema y retener los principales sólidos arrastrados por el agua. Tipos de pretratamientos para entradas: Superficial y subterráneos. Además, algunos SUDS también pueden hacer de pretratamiento para otros situados aguas abajo	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 6, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 14-18.

ii. Elementos internos.

Superficies permeables.

El diseño de las superficies permeables consta de dos partes: la estructural y la hidrológica y el proceso de diseño consta de tres fases:

1. **Pruebas de suelo.**
2. **Diseño Estructural.**
3. **Diseño hidrológico.**

Los ensayos a ejecutar tienen por objeto conocer si el suelo tendrá capacidad para sostener e infiltrar el agua, y para el diseño estructural hay que tener en cuenta el tráfico que rodará sobre él, los parámetros específicos del suelo, y el espesor de la superficie permeable

El objetivo del diseño hidrológico es que la superficie tenga la capacidad de dejar pasar el agua a una velocidad tal que o bien se pueda ir infiltrando en el suelo sin problemas o bien se pueda ir almacenando en una subcapa preparada para almacenar el agua que se va a infiltrar lentamente o que se va a conducir a otro punto para su adecuada gestión.

Almacenamiento.

Cuadro 28. Tipos de Almacenamientos para los diferentes SUDS.

Almacenamiento	Características
Tubos de detención.	Una forma bastante común actualmente en el AMSS de retener las pluviales en zonas densamente urbanizadas es mediante tubos de grandes dimensiones colocados a una pendiente muy suave que podría estar entre el 0,2% y 0,5% que sirven de almacenamiento para las aguas lluvias.
Prefabricados.	Existen varios modelos de elementos prefabricados que permiten almacenar el agua de forma segura y estanca en el subsuelo como los depósitos plásticos o las celdas prefabricadas combinadas con geomembranas impermeabilizantes. Puesto que la forma y tipo de elemento determinan su capacidad de retención y condicionan las entradas y salidas, en esta fase el proyectista ha de evaluar cuál de los elementos prefabricados es más adecuado para la cadena de drenaje.
Suelo.	La mezcla de suelo a emplearse en los sistemas de biorretención ha de permitir que el agua drene en las siguientes 24 horas y permita el crecimiento radicular de las especies vegetales.
Gravas y agregados.	Los SUDS emplean distintos tipos de gravas (diferentes tamaños) según su localización y función dentro del sistema. En las juntas de pavimentos modulares permeables, alrededor de las celdas plásticas o en las superficies de las zanjas de infiltración se puede emplear gravillín Su función es hacer de filtro, no almacenar agua, por lo que su espesor es de pocos centímetros cuando se coloca sobre zanjas y se queda a ras de los Módulos de las superficies permeables.
Materiales Reciclados	También pueden emplearse materiales reciclados, pero se debe tener cuidado de que sean de calidad constante, tenga una clasificación adecuada y esté libre de materiales inaceptables, como materia orgánica o chatarra de acero Es importante que los materiales reciclados no se degraden en el servicio y no filtren los contaminantes a las aguas superficiales. El material a emplear deberá cumplir con unos estándares mínimos en la resistencia a la fragmentación, resistencia al desgaste, durabilidad, forma, absorción de agua y lixiviación de contaminantes que, como los establecidos en las normas internacionales UNE-EN 933-8 y UNE-EN 1097-2.
Geotextiles.	Los geotextiles se emplean dentro de los SUDS para actuar como filtros y separadores de medios Sus funciones son principalmente la de impedir que limos y partículas finas entren en las capas de almacenamiento de gravas para que no se colmaten o la de servir como elemento de protección del sistema dentro del suelo.
Geomembranas.	Las geomembranas son láminas impermeabilizantes que se emplean para evitar que el agua percole hacia el subsuelo. Generalmente se fabrican de polietileno de alta densidad o de polipropileno Al igual que con los geotextiles, se recomienda revisar con el fabricante del producto sus cualidades para asegurar que son las idóneas para cada tipo de proyecto. Se deben cumplir con las normas propuestas en Capítulo 6, <i>Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 15.</i>

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 6, *Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 5 - 14.*

Conducción dentro del sistema.

Drenes

En áreas de biorretención y pavimentos permeables no siempre podrá darse la infiltración, por lo que se emplean sólo como sistema de almacenamiento. Para evacuar la escorrentía acumulada en la matriz porosa, se requiere entonces de un dren que discurre por la capa drenante, la inferior, recolectando el agua y sacándola del sistema una vez retenida el tiempo considerado en el diseño.

Su dimensionamiento dependerá del caudal necesario a evacuar y puede realizarse aplicando la fórmula:

$$q = C(h - H_d)^n$$

Ec.10. Caudal de flujo de salida.

- q : Es el flujo de salida (mm/hr).
- h : Es la altura total del agua almacenada (mm).
- H_d : Es la altura del desagüe, o diámetro del tubo dren de salida.

El coeficiente C y exponente n determinan la tasa de flujo a través del desagüe en función de la altura del agua almacenada por encima de la cota del desagüe. Para los drenes, que captan el agua a través de ranuras, se considera que éstas actúan como orificios dando al exponente un valor de 0.5 y al coeficiente de drenaje 60,000 veces la relación del área total de ranuras respecto a la del SUDS.

Los diámetros típicos a emplear en los SUDS suelen estar entre 80 y 300 mm.

Vertederos:

Vertedero con conexión superficial escalonada de AB

En terrenos donde la pendiente supera el 5% es conveniente acondicionar el SUDS y muchas veces se hace escalonándolo, para ello se hace pasar al agua de una superficie a otra mediante un desnivel, en vez de mantener la pendiente superficial. De esta manera el SUDS se puede dividir en módulos que se colocan

escalonados, por motivos de seguridad estructural (para evitar deslizamientos de laderas); por lo que, hay que dimensionar la **conducción** del agua en todos los módulos, que puede realizarse mediante las fórmulas de un vertedero transversal de sección rectangular:

$$Q = C_w \cdot L \cdot h^{3/2}$$

Ec. 11. Caudal saliente por vertedero transversal de sección rectangular.

O de sección trapezoidal:

$$Q = C_w \cdot L \cdot h^{3/2} + C_{ws} \cdot S \cdot h^{5/3}$$

Ec. 12. Caudal saliente por vertedero transversal de sección trapezoidal.

C_w : Coeficiente de descarga del vertedero.

- L : Longitud del vertedero.
- S : Pendiente del lado del vertedero en "V" o del vertedero trapezoidal.
- h : Altura de la lámina vertiente sobre la cresta.
- C_{ws} : Coeficiente de descarga a través de los lados de un vertedero trapezoidal.

iii. Salida del sistema

La salida del sistema se suele producir por colectores abiertos o cerrados que funcionan en lámina libre. Sus características son similares a los de la entrada, deben estar protegidos para que no entren animales, ni se dañen y, dependiendo de cada caso, puede ser necesario establecer elementos de control para evitar la erosión aguas abajo.

Cuadro 29. Tipos de Salidas, dimensionamiento y características

Tipo de Salida	Características	Dimensionamiento
<p>Salida por apertura en sistema de almacenamiento: Orificio.</p>	<p>Un orificio es una abertura en el sistema que permite una descarga controlada del caudal de salida.</p>	<p>Una forma de estimar el área necesaria que ha de tener este elemento para que la salida de agua se produzca con el caudal de diseño es mediante la ecuación típica de un orificio sumergido:</p> <p><i>Ec.13. Área de la sección transversal interna del orificio.</i></p> $A_o = \frac{A_s}{C_d} \left(\frac{gt^2_{descarga}}{2h} + 1 \right)^{-1/2}$ <ul style="list-style-type: none"> - A_o: Área de la sección transversal interna del orificio (m²). - A_s: Área en planta de la toma de almacenamiento el SUDS (m²) para un volumen de almacenamiento en forma de prisma recto. - C_d: Coeficiente de descarga (m). Un valor típico es $C_d = 0,60$ m, si el espesor de la pared donde está es inferior al diámetro del orificio, 0.8; y si los cantos del orificio están redondeados, 0.92. - g: Aceleración originada por la gravedad (m/s²). <p><i>Ec.14. Tiempo de descarga o vaciado.</i></p> $t_{descarga} = \sqrt{\frac{2h}{g} \left[\frac{A_s^2}{(A_o \cdot C_d)^2} - 1 \right]}$ <ul style="list-style-type: none"> - $t_{descarga}$: Tiempo de vaciado (s). - h: Distancia desde la superficie de la lámina de agua hasta el centro del orificio (m).

Cuadro 29. Tipos de Salidas, dimensionamiento y características

Tipo de Salida	Características	Dimensionamiento
<p>Salidas de emergencia.</p> <p>Estos elementos se instalan para que, cuando se exceda el volumen para el que fue dimensionado un SUDS, se pueda evacuar sin poner en riesgo ni el funcionamiento del sistema ni la seguridad y salud de las personas y sus bienes.</p>	<p><i>Aliviadero en depósitos de detención subterráneos construidos.</i></p>	$Q = C_w \cdot L \cdot h^{5/3}$ <p><i>Ec.15. Caudal de descarga.</i></p> <p>C_w: Coeficiente de descarga del vertedero. - L: Longitud del vertedero. h: Diferencia de alturas en el vertedero</p>
	<p><i>Rebosadero de emergencia.</i></p> <p>La instalación de rebosaderos de emergencia se recomienda sobre todo donde la incapacidad del sistema para tratar periodos de retorno superiores a los de cálculo pueda causar graves problemas a la circulación del excedente de escorrentía.</p>	$Q = C_w \cdot L \cdot h^{3/2}$ <ul style="list-style-type: none"> - C_w: Coeficiente de descarga del vertedero. - L: Longitud del vertedero. - h: Altura de la lámina vertiente sobre la cresta.
	<p><i>Tubo perforado.</i></p> <p>Una forma característica de evacuación de los excedentes de caudal en las áreas de biorretención es mediante el empleo de un tubo vertical con orificios en la parte expuesta de la zona de inundación. Si el agua alcanza la máxima profundidad de almacenamiento prevista, comienza a evacuarse por las hendiduras u orificios del tubo evitando que el sistema desborde.</p>	$Q = \frac{C_p \cdot 2A_p \cdot (2g)^{1/2} H^{3/2}}{3H_s}$ <ul style="list-style-type: none"> - Q: Caudal descargado (m³/s). - C_p: Coeficiente de descarga (para perforaciones = 0,61). - A_p: Área de sección transversal de todos los orificios (m²). - H_s: Distancia desde S/2 por debajo de la fila más baja de agujeros hasta S/2 por encima de la fila superior cubierta de agua(m). - S: Distancia entre agujeros (m). - H: Altura en el tubo vertical medido desde S/2 debajo de la línea central de la fila más baja de agujeros.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 6, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 18 - 20.

b. Paso 2: Acercamiento al proyecto constructivo.

Una vez definidas las dimensiones necesarias para todos los elementos y componentes complementarios del tren de drenaje, el siguiente paso es comprobar la adecuación de los productos existentes en el mercado al proyecto. Hay que seleccionar el más parecido y comprobar numéricamente su funcionamiento; y así con todos los elementos cuyas dimensiones vengan predeterminadas, de manera que se verifique numéricamente el correcto funcionamiento de la cadena.

Estos ajustes pueden ser más problemáticos con los elementos de detención prefabricados, puesto que tienen limitadas formas y capacidades.

Puesto que en este paso se van a seleccionar todos los elementos constructivos del proyecto, es conveniente que se establezcan las tareas de mantenimiento de la cadena de gestión.

El proyectista deberá seleccionar, según disponibilidad en el mercado, aquellos elementos que menos requerimientos tengan a largo plazo y que faciliten el funcionamiento de los sistemas con las mínimas tareas de mantenimiento posible. Los materiales empleados deben tener el certificado de calidad del proveedor como se especifica en el *Reglamento a la Ley de desarrollo y ordenamiento territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los municipios aledaños*.

Los SUDS además pueden incluir elementos típicos del drenaje convencional como tubos y tragantes. Sus dimensiones deben cumplir con lo establecido en el artículo V. 62 *Obras de Urbanización para Aguas Lluvias del Reglamento a la Ley de desarrollo y ordenamiento territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los municipios aledaños*.

Definición de las tareas de mantenimiento.

Será el proyectista el que defina las tareas de mantenimiento necesarias para el correcto funcionamiento a largo plazo del SUDS. El proyectista también deberá considerar los lineamientos establecidos por la autoridad competente, entregando los manuales de operación y mantenimiento a la entidad que ésta defina. Es muy importante definir las tareas de mantenimiento y establecer responsabilidades, a nivel usuario particular y a nivel municipal si es necesario, ya que el funcionamiento adecuado de los *SUDS* depende de su correcto estado.

c. Paso 3: Creación de un modelo de simulación SUDS.

La última revisión de la cadena ha de realizarse mediante un software de simulación que ayude a comprobar el comportamiento integrado de todos los componentes del tren de drenaje y su interacción con las redes de drenaje primario y/o secundario.

En la revisión final del modelo mediante software, hay que comprobar como mínimo:

- Que los elementos no se colapsan para la lluvia de diseño, ni durante las 24 horas después de que se producen interacciones negativas con las laminaciones de los caudales en los diferentes dispositivos de almacenamiento.
- Que se pueden transportar los caudales por los sistemas, dejando un resguardo de seguridad del 20% en aquellos conductos de nueva construcción.
- Que el comportamiento de los sistemas localizados aguas abajo no interfiere en el funcionamiento de técnicas aguas arriba.
- En caso de que se vierta a una red existente también se deberá incorporar al modelo para comprobar que el aporte de caudal del proyecto no causa incapacidad del sistema.
- Que las velocidades de flujo y las profundidades de la esorrentía en los elementos no ponen en riesgo la seguridad y salud de las personas.

2.6.5 Informe final de diseño.

Una vez definido el modelo de proyecto, realizados todos los cálculos, dimensionados los elementos principales y accesorios y comprobado su funcionamiento numéricamente, se elabora un informe final con doble propósito:

- Servir de Guía al constructor que ejecutará el proyecto.
- Reflejar la información solicitada y necesaria para la obtención de los permisos de Parcelación y Construcción de la OPAMSS.

Puesto que los SUDS constituyen una vía que facilita la obtención de puntos para el logro de la certificación HAUS, ya que suponen una gestión más sostenible de las aguas pluviales y la reducción de la contaminación de la escorrentía, el formato de presentación del proyecto ha de seguir el formato especificado en la guía *HAUS*.

En lo referente a los SUDS incluidos en el terreno, es recomendable incluir; además:

- Una ficha técnica de cada SUDS contenido en el proyecto con los datos de su funcionamiento.
- Las especificaciones técnicas de los materiales a emplear en la construcción de las técnicas de drenaje sostenible.

El proyectista deberá tener en cuenta que, una vez realizada la construcción de un sistema de infiltración, deberá realizar una prueba de funcionamiento la cual deberá ser incluida en las inspecciones técnicas de seguimiento en atención a lo establecido en el artículo VIII.26 "Inspecciones de las obras" del Reglamento a la Ley de desarrollo y ordenamiento territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los municipios aledaños.

Fichas de control.

Para facilitar al proyectista la presentación de la documentación necesaria relativa a los SUDS para la obtención de la licencia pertinente, se proponen una serie de fichas que puede presentar adjuntas con el informe final de proyecto.

1. Fichas relativas a la documentación que se presenta adjunta según envergadura de proyecto.
2. Fichas relativas a las dimensiones y capacidades de cada una de las técnicas desarrolladas en el proyecto.

Documentación adjunta.

La información y datos a estudiar dependerán del tamaño de la zona de actuación. Para intervenciones inferiores a los 500 m² (medidas de control en origen principalmente), como puede ser por ejemplo la construcción de una casa o un edificio en altura de viviendas, la documentación adjunta a presentar será menor que en intervenciones mayores donde hay más factores que analizar. La guía proporciona unas hojas de control¹⁴ de la documentación respectivas para proyectos inferiores y mayores de 500 m².

Características de los SUDS de proyecto.

En la guía técnica se proponen una serie de fichas¹⁵ para cada uno de los sistemas de drenaje urbano sostenible mostrados en el Módulo 3 de esta. Se trata de unas tablas para rellenar con las dimensiones de cada uno de los componentes de cada SUDS, son unas fichas generales, por poner un ejemplo, en la ficha de zanjas filtrantes vienen definidos varios elementos de entrada, pero en un proyecto sólo entra el caudal por una vía. Por tanto, la ficha a entregar en el informe final solo tendrá que especificar las dimensiones de esa vía.

¹⁴ Se pueden consultar estas hojas de control en Capítulo 7, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, págs. 6 y 7.

¹⁵ Se pueden consultar estas fichas en Capítulo 7, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, págs. 9 a 35.

2.6.6 Principios básicos de diseño.

Los tres principios básicos que ha de considerar el proyectista en la realización del diseño son:

- **Calidad de servicio ofrecido.**
- **Relación entre costo y eficacia.**
- **Sostenibilidad.**

a. **Calidad de servicio ofrecido.**

La calidad del servicio puede ser descrita como la eficacia de los elementos para servir a su propósito. En términos de drenaje urbano, podemos distinguir los siguientes propósitos:

- **Protección ante las inundaciones.**
- **Capacidad para tratar la contaminación.**
- **Mejora estética de la zona.**
- **Beneficios sociales.**
- **Cumplir requisitos de seguridad.**

La protección frente a una inundación debe proporcionarse a un nivel mínimo de servicio. Los riesgos a las personas y los beneficios que puedan tener se deben plantear en el diseño.

b. **Rentabilidad.**

Un análisis del coste del sistema debe demostrar que es viable en el aspecto financiero.

El diseño de un proyecto debe tener como objetivo proporcionar la solución más rentable, sobre todo en lo referente a los requisitos de mantenimiento; esto requiere tener en cuenta el costo global del sistema, desde su construcción hasta los costos de mantenimiento y reparación en los años venideros; además, de analizar las posibles opciones alternativas. La evaluación más apropiada del sistema debe incluir los tres beneficios más importantes: los hidráulicos, la mejora de la calidad del agua y los ambientales.

c. Principio de sostenibilidad.

Hay muchas definiciones para el término sostenibilidad, pero en términos de drenaje se puede interpretar como:

- **La utilización de la mínima cantidad de recursos y materiales en los procesos constructivos.**
- **La reducción del impacto ambiental en su construcción y funcionamiento.**
- **La replicación de hidrograma pre desarrollo urbanístico en la medida de lo posible.**

Los SUDS deben considerarse dentro de un enfoque holístico, basado en el marco de la sostenibilidad. Esto significa que todos los costos y beneficios ambientales, junto con los factores económicos y sociales, deben ser evaluados en el proceso de decisión, especialmente cuando se comparan estas técnicas con el drenaje convencional. Para ello se requiere de la identificación y consideración de factores, tales como la energía necesaria para la construcción de las zanjas de drenaje convencional, la pérdida de hábitat por el desarrollo urbano y los impactos de las inundaciones sobre el valor de las propiedades inmobiliarias.

Los SUDS han de aspirar a proteger el medio ambiente y, al mismo tiempo, minimizar el uso de energía y recursos naturales en su diseño, construcción y operatividad.

El diseño de un sistema de drenaje sostenible trata de replicar, de manera general, las mismas características del proceso precipitación-escorrentía en condiciones naturales o de pre-urbanización caracterizada, por que, durante las lluvias de baja intensidad y duración, prácticamente no se produce una escorrentía superficial y cuando lo hace es más lenta y está menos contaminada; esto se puede lograr mediante la infiltración en el terreno que se produce en muchas de las técnicas de drenaje sostenible.

Para potenciar la sostenibilidad en la construcción de los SUDS se recomienda:

- La reutilización y reciclaje de los materiales derivados de los movimientos de tierras y demoliciones, siempre y cuando cumplan con unos requisitos mínimos
- La reducción del volumen de residuos mediante el seguimiento del volumen de los materiales utilizados
- El uso de materiales agregados o producidos a partir de plásticos reciclados
- Tratamiento in situ y compostaje de los sedimentos y otros residuos procedente de la construcción de las SUDS con objeto de reducir los volúmenes de material extraído.
- Búsqueda de la eficiencia en los procesos constructivos.

d. Puntos en la sostenibilidad de la Cadena de Gestión.

La gestión del drenaje de una zona mediante un tren o cadena de gestión busca la sostenibilidad mediante la imitación de la naturaleza, pero para que ello sea posible hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

- Las aguas pluviales deben ser tratadas en su origen siempre que sea posible y solamente los caudales más altos se deben pasar hacia las aguas abajo.
- La mayor proporción de los contaminantes debe retenerse en los componentes de la serie localizados aguas arriba, lo que minimiza los riesgos a los componentes de aguas abajo, y ayuda a asegurar que las altas concentraciones de contaminantes no se transmitirán a las aguas receptoras.
- El tratamiento de la escorrentía proveniente de una zona pequeña requerirá menos etapas de tratamiento que la escorrentía de la cuenca urbana de gran tamaño.
- Cuanto mayor sea el número de las técnicas utilizadas en la cadena de gestión, mejor será el rendimiento, y menor será el riesgo de fallo del sistema en general.
- La conducción de agua entre las distintas partes en la cadena de gestión debe ser considerada a través del uso de sistemas de conducción natural, como, por ejemplo, zanjas o cunetas verdes, siempre que sea posible.
- Los colectores tipo tuberías entre los diferentes eslabones de la cadena deben evitarse, aunque en algunos casos serán necesarios, sobre todo cuando el espacio es limitado.

Una cadena de tratamiento multicomponente utiliza una amplia gama de procesos de tratamiento que maximicen la eficiencia del tratamiento de una amplia gama de contaminantes.

- El tratamiento se puede combinar tanto con los componentes de conducción, como los de almacenamiento.
- Cuando los riesgos ambientales tienden a ser altos, deben incluirse un mayor número de componentes dentro de la cadena de gestión. Si los riesgos son bajos, siempre que los criterios hidráulicos se cumplan, es suficiente con unas pocas técnicas.
- Es recomendable que, para las áreas con un tamaño mayor de 2 hectáreas, se creen varias subcuencas y la escorrentía de cada una se dirija a varios componentes en cadena.

2.6.7 Características básicas de los SUDS.

Los sistemas de drenaje urbanos sostenibles abarcan una gran variedad de elementos o técnicas que pueden catalogarse de diferentes formas dependiendo de varios factores, como por ejemplo de si requieren de alguna clase de construcción, si actúan donde se genera la escorrentía o aguas abajo, de cómo tratan la contaminación del agua, etc.

Un primer tipo de clasificación, y la más simple de todas, es la que distingue las medidas entre estructurales y no estructurales:

- Las medidas estructurales son aquellas que gestionan la escorrentía mediante actuaciones que contengan algún elemento constructivo.
- Las no estructurales son las que no precisan ni una actuación directa sobre la red ni la construcción de infraestructura alguna.

A su vez, las medidas estructurales pueden dividirse según el principal proceso que se produce en ellas:

- **Filtración**, ocurre cuando se hace pasar el agua a través de diferentes medios como puede ser un geotextil, una superficie con grama o un lecho de gravas, este proceso sirve para retener partículas contaminantes, pero no es efectivo en el control del volumen de escorrentía.
- **Infiltración**, se produce cuando se permite que el agua de lluvia se introduzca por los poros del subsuelo de manera que el flujo que iría escurriendo por la superficie

del terreno se transforma en flujo subterráneo. Este proceso reduce la cantidad total de escorrentía generada.

- **Detención**, se produce cuando se almacena durante un breve periodo de tiempo la escorrentía antes de que se incorpore a la red de drenaje o se vierta al medio natural.
- **Retención**, es el almacenamiento durante un período de tiempo prolongado de la escorrentía, parte de ese volumen almacenado es susceptible de evaporarse, infiltrarse o ser captado por la vegetación.
- **Recolección**, es la cosecha de las aguas lluvias para su posterior consumo.
- **Otros** tratamientos de la calidad de la escorrentía, en muchas técnicas se **Infiltración** retienen y eliminan partículas en suspensión por procedimientos diferentes a la filtración como la bioacumulación, el metabolismo bacteriano, la absorción radicular etc.

O también, según el lugar de la cadena de gestión de control de aguas lluvias donde se localicen:

- Medidas de control en origen o aguas arriba: Métodos de control que se aplican “in situ”, o sea, en el mismo lugar donde se genera la escorrentía.
- Medidas de control en vertido o aguas abajo, son las que se emplean sobre la escorrentía una vez generada de forma previa a su vertido al medio.

Éstas no son las únicas formas de clasificar los diferentes SUDS y, en la mayoría de los casos, un mismo SUDS puede pertenecer a una o más categorías; por ejemplo, un área de biorretención puede ser un sistema de detención, de infiltración y de filtración.

Para ayudar a visualizar las principales características que categorizan a este tipo de técnicas estructurales, se muestran las siguientes tablas que resumen la información de cada técnica estructural contemplada en la Guía de Diseño; se han clasificado según el principal proceso que tienen especificando además qué procesos pueden darse en cada una de ellas, lo que no significa que necesariamente hayan de darse todos.

1. Técnicas de drenaje urbano sostenible cuyo principal uso es el control de las aguas lluvias en origen.

- Cubiertas verdes:
- Superficies permeables
- Depósitos de recolección de aguas lluvia

Cuadro 30. Principales características de las técnicas de control en origen.

Principales Características		T. verdes	Rec. ALL	S. permeables
Localización en la cadena de gestión	Pretratamiento	X		X
	Control en origen	X	X	X
	Medida de transporte			
	Control local			
	Control regional			
Principales procesos dentro del SUDS	Infiltración			X
	Filtración	X		X
	Almacenamiento	X	X	X
	Trasporte			
Procesos de descontaminación	Adsorción	X		X
	Biodegradación	X		X
	Filtración			X
	Precipitación			
	Sedimentación			X
	Volatilización			
Objetivos principales	Almacenar agua de lluvia		X	
	Mejorar la calidad ambiental	X		X
	Descontaminar	X		X
	Recargar el acuífero.			En algunos casos
	Ralentizar la escorrentía	X		X
Rendimientos	Reducción del caudal punta	Medio	Alto	Bueno
	Reducción del volumen de escorrentía	Medio	Alto	Bueno
	Tratamiento de calidad de agua	Bueno	Escaso	Bueno
	Beneficio social/urbano	Bueno	Escaso	Bajo
	Beneficio ecológico	Medio	Escaso	Bajo

Fuente: OPAMSS, Capítulo 9, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 3.

2. Técnicas de drenaje urbano sostenible cuyo principal proceso sobre la escorrentía es la filtración.

- Áreas de bioretención.
- Cunetas verdes.
- Franjas filtrantes.

Cuadro 31. Principales características de las técnicas cuyo principal proceso sobre la escorrentía es la filtración

Principales Características		Áreas de bioretención	Cunetas verdes	Franjas filtrantes
Localización en la cadena de gestión	Pretratamiento			
	Control en origen	X	X	X
	Medida de transporte		X	
	Control local	X	X	X
	Control regional			
Principales procesos dentro del SUDS	Infiltración	X		
	Filtración	X	X	X
	Almacenamiento	X		
	Trasporte		X	X
Procesos de descontaminación	Adsorción	X	X	
	Biodegradación	X	X	X
	Filtración	X	X	X
	Precipitación			
	Sedimentación	X	X	
	Volatilización			
Objetivos principales	Almacenar agua de lluvia			
	Mejorar la calidad ambiental	X	X	X
	Descontaminar	X	X	
	Recargar el acuífero.			
	Ralentizar la escorrentía		X	X
Rendimientos	Reducción del caudal punta	Medio	Medio	Escaso
	Reducción del volumen de escorrentía	Medio (alto si hay infiltración)	Medio	Escaso
	Tratamiento de calidad de agua	Bueno	Bueno	Medio
	Beneficio social/urbano	Bueno	Medio-bajo	Medio
	Beneficio ecológico	Medio	Medio	Medio

Fuente: OPAMSS, Capítulo 9, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 5.

3. Técnicas de drenaje urbano sostenible cuyo principal proceso sobre la escorrentía es la infiltración.

- Pozos de infiltración.
- Zanjas de infiltración.
- Lagunas de infiltración.

Cuadro 32. Principales características de las técnicas cuyo principal proceso sobre la escorrentía es la infiltración.

Principales Características		Pozos de infiltración	Zanjas de infiltración	Lagunas de infiltración
Localización en la cadena de gestión	Pretratamiento			
	Control en origen	X	X	
	Medida de transporte		X	
	Control local	X		X
Principales procesos dentro del SUDS	Infiltración	X	X	X
	Filtración	X	X	X
	Almacenamiento	X	X	X
	Trasporte			
Procesos de descontaminación	Adsorción			
	Biodegradación			
	Filtración	X	X	X
	Precipitación			
	Sedimentación			
Objetivos principales	Almacenar agua de lluvia			
	Mejorar la calidad ambiental			
	Descontaminar	X	X	X
	Recargar el acuífero.	X	X	X
	Ralentizar la escorrentía			
Rendimientos	Reducción del caudal punta	Bueno	Medio	Medio
	Reducción del volumen de escorrentía	Bueno	Alto	Bueno
	Tratamiento de calidad de agua	Bueno	Alto	Bueno
	Beneficio social/urbano	Bajo	Bajo	Bueno
	Beneficio ecológico	Bajo	Bajo	Bueno

Fuente: OPAMSS, Capítulo 9, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 7.

4. Técnicas de drenaje urbano sostenible cuyo principal proceso sobre la escorrentía es la detención/retención.

- Depósitos de detención
- Estanques de laminación

Cuadro 33. Principales características de las técnicas cuyo principal proceso sobre la escorrentía es la detención/retención.

Principales Características		Depósitos subterráneos de retención	Estanques de laminación
Localización en la cadena de gestión	Pretratamiento		
	Control en origen	X	
	Medida de transporte		
	Control local	X	X
	Control regional	X	X
Principales procesos dentro del SUDS	Infiltración		X
	Filtración		
	Almacenamiento	X	X
	Trasporte		
Procesos de descontaminación	Adsorción		X
	Biodegradación		X
	Filtración		X
	Precipitación	X	
	Sedimentación	X	X
	Volatilización		
Objetivos principales	Almacenar agua de lluvia	X	X
	Mejorar la calidad ambiental		X
	Descontaminar		X
	Recargar el acuífero.		
	Ralentizar la escorrentía	X	
Rendimientos	Reducción del caudal punta	Alto	Bueno
	Reducción del volumen de escorrentía	Escaso	Escaso (si no hay infiltración)
	Tratamiento de calidad de agua	Medio	Bueno
	Beneficio social/urbano	Alto	Bueno
	Beneficio ecológico	Bajo	Bueno

Fuente: OPAMSS, Capítulo 9, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 9.

2.6.8 Depósitos de lluvia.

Cuadro 34. Aspectos generales de los Depósitos de Lluvia.

Depósitos de Lluvia	
Descripción	Son depósitos que se emplean para recolectar y almacenar el agua de lluvia que cae principalmente en la cubierta de una edificación (aunque también puede ser otra superficie de captación). Pueden ser subterráneos o superficiales y estar contruidos de materiales diferentes en función de su capacidad y su localización.
Funcionamiento	El agua que precipita sobre el techo va a parar a unas canaletas que la conducen hacia un bajante que desemboca en el depósito de recolección de lluvia. Ahí se conserva para, posteriormente, darle algún uso, como sería agua de riego, para cisternas de baño, agua para lavar
Componentes	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie de captación (suele ser un tejado). - Elementos de conducción de las aguas lluvias como canaleta y bajantes. - Filtro o rejilla para retener sólidos arrastrados desde la cubierta. - Depósito de recolección de pluviales. - Toma de agua almacenada. - Rebosadero o salida del excedente de aguas
Usos Típicos	Recogida de agua de las cubiertas de los edificios para su posterior uso. En interior de edificios para cisternas de inodoros, lavado de suelos y lavadora (aconsejable un tratamiento complementario) En exterior de edificios para regar, lavado de suelos o lavado de vehículos. También se le pueden dar usos industriales
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Los depósitos de lluvia pueden suponer una nueva fuente del agua como recurso (para limpieza, riego...), reduciendo su demanda de la red de abastecimiento. - Reduce el pico del hidrograma en la red de microdrenaje al retener parte del agua de lluvia. - Si el agua recogida no es para consumo directo, no necesita un tratamiento, por lo que la instalación del sistema es barata
Limitaciones	<p>Si hay que instalar un sistema de tratamiento, se encarece bastante.</p> <ul style="list-style-type: none"> - A veces se requiere de un sistema de bombeo. - Estéticamente no suelen ser atractivos.
Requisitos de mantenimiento	Hay que inspeccionarlos y limpiarlos periódicamente.
Rendimiento	<p>Reducción del caudal punta: Depende del diseño.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reducción de volumen: Depende del diseño. - Tratamiento de calidad de agua: Escaso. - Potencial beneficio social/urbana: Escaso. - Potencial ecológico: Escaso

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 10, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-6.

Diseño.

Consideraciones en el diseño.

Localización.

Los depósitos de pluviales pueden ponerse bajo tierra de manera que no requerirían de espacio en la superficie (aunque en ese caso se requerirá de bombeo). Para evitar riesgo de contaminación del agua en su trayecto al depósito y abaratar en medios de conducción, es recomendable que se sitúen cerca de los puntos de recogida y de consumo.

Área de captación.

La superficie del área de captación de aguas lluvias dependerá del volumen de agua que se quiera recoger. Aunque la disponibilidad de la suficiente superficie para recolectar ese volumen de aguas lluvias puede ser un factor limitante. Esta área, salvo por operaciones de mantenimiento, no será transitable.

Filtros.

Antes de entrar en los depósitos, las aguas lluvias deben ser filtradas para evitar la entrada de partículas que pueden mermar el funcionamiento del sistema y empeorar la calidad del agua almacenada. Los filtros han de estar adaptados a la naturaleza del área de captación y también a los requerimientos del agua para el uso que se le vaya a dar. Los filtros deben ser dimensionados en función del caudal de agua que puede pasar por ellos.

El Depósito.

El depósito debe ser exclusivamente para uso en un sistema de reaprovechamiento de agua de lluvia por lo que debe estar limpio antes de la entrada de agua. El material del que esté hecho no debe alterar en ningún caso la calidad del agua almacenada y puede ser de diferente naturaleza, incluso puede tratarse de un simple barril plástico o de madera tratada.

Dimensionamiento.

El dimensionamiento del depósito de pluviales depende de 3 factores:

- **Superficie de captación de agua pluvial.**
- **Precipitación media de la zona.**
- **Demanda que se pretende satisfacer.**

Una metodología simplificada de apreciación del volumen requerido es:

1- Estimar el volumen de agua que se puede recoger anualmente.

$$Vol_R = A \cdot P \cdot C$$

Ec. 17. Volumen anual que puede recolectarse.

- *A*: m² de superficie de captación de agua, independientemente de su forma e inclinación.
 - *P*: Pluviometría anual media de la ubicación.
 - *C*: Coeficiente de rendimiento, es función del tipo de superficie:
 - Techo duro inclinado 0.8
 - Techo plano sin gravilla 0.8
 - Techo plano con gravilla 0.6
 - Techo verde intensivo 0.3
 - Techo verde extensivo 0.5
 - Superficie empedrada/superficie con empedrado compuesto 0.5
 - Revestimiento asfáltico 0.8
- 2- Estimar el gasto anual de aguas pluviales, es decir, del volumen de agua que se va a gastar en los diferentes usos que se hayan.**
- 3- Comparar ambos volúmenes.**
- 4- Si el volumen de agua que puede recolectarse es inferior al de las necesidades, ese valor será el que se emplee para dimensionar el sistema.**
- 5- Si ocurre lo contrario, entonces se dimensionará el sistema para las necesidades de uso y el excedente se enviará a otro sistema de gestión.**

6- A partir de los días que transcurren entre lluvias (DS), determinar el volumen del depósito:

$$Vol_{SRP} = \frac{Vol_E \cdot D_{LL}}{365}$$

Ec. 18. Volumen del depósito.

- Vol_{SRP} : Volumen sistema recolección de pluviales.
- Vol_E : Volumen anual a emplear.
- D_{LL} : Días que transcurren entre lluvias.

Esta metodología permite variantes, como la estimación a nivel mensual (en vez de anual) y posterior ponderación del volumen de recolección.

Instalación.

La instalación de un sistema de recolección y reuso de aguas lluvias depende de la complejidad del mismo.

Pero, en cualquier caso, hay que controlar los siguientes puntos:

- La conducción de las aguas lluvias desde su punto de origen al depósito ha de producirse de la forma más directa posible evitando disminuciones de secciones conforme se va de aguas arriba hacia el depósito
- El sistema de recolección y reuso de aguas lluvias ha de ser completamente independiente de la red de abastecimiento de agua potable (y de la red de saneamiento), por lo que se han de evitar las conexiones cruzadas entre los diferentes sistemas de aguas del edificio donde se instale.
- Información mediante etiquetas, carteles o notas informativas en el depósito y en los puntos de salida de las aguas lluvias (cisternas, grifos, etc.) como mínimo, que se trata de un sistema de reuso de aguas lluvias y que por tanto se trata de agua no potable.

- Respecto a las canaletas, tubos y elementos empleados, no deben estar compuestos de materiales con componentes tóxicos y la circulación del agua no debe estrangularse entre el paso de un elemento a otro.

Mantenimiento.

Para que el agua almacenada en el depósito de recolección de aguas lluvias mantenga la calidad requerida en función de su uso final, se hace necesario un mantenimiento periódico de todo el sistema de reaprovechamiento de agua pluvial mínimo una vez al año. Los principales aspectos a controlar son los siguientes:

- Revisión, limpieza y sustitución, en caso de que sea necesario, de los elementos que captan la lluvia, como cubiertas, canaletas y bajantes.
- Inspección y limpieza periódica del depósito, filtros, rebosaderos, válvulas y demás elementos complementarios, así como de los sistemas de distribución.
- Comprobar periódicamente el funcionamiento de los sistemas de desinfección automáticos (en caso de que los hubiera).
- Vigilar el funcionamiento de bombas (si las hay) y reparar si hay algún fallo.

2.6.9 Techos verdes.

Cuadro 35. Aspectos generales de los techos verdes.

Techos Verdes	
Descripción	Los techos verdes están concebidos para interceptar y retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando el caudal pico. Estructuralmente consiste en un sistema multicapa colocado sobre los tejados de los edificios en el que se favorece el crecimiento de vegetación. Incluyen terrazas, tejados y balcones tanto de uso público como privado y pueden tener o no con acceso directo a ellas. Algunas inclusive sirven de espacio lúdico.

Techos Verdes	
Funcionamiento	<p>Son techos de un edificio que parcial o completamente cubiertos con vegetación y un medio de cultivo, sobre una membrana impermeabilizante. Tienen diferentes propósitos, uno es la absorción de lluvia que queda retenida por la vegetación, el sustrato y en algunas de las capas inferiores antes de pasar a la red de alcantarillado. Y además proporciona el aislamiento térmico, crean un hábitat para la fauna, y contribuyen a bajar la temperatura del aire urbano combatiendo el efecto isla de calor</p>
Componentes	<p>1. Capa impermeabilizante. Evita que, en caso de rotura de la capa drenante o cambios en tareas de mantenimiento, el agua penetre bajo la cubierta.</p> <p>2. Barrera de raíces. Previene contra raíces de plantas vigorosas que pueden penetrar a través de la membrana impermeable dañándola, lo que puede producirse con más facilidad en cubiertas con estratos más gruesos, pues a ellas pueden llegar malas hierbas cuyas raíces son más penetrantes.</p> <p>3. La capa de drenaje. Controla el agua de retención del tejado y sus propiedades en combinación con el sustrato. Esta capa se emplea para evitar la erosión producida por la filtración del agua y el encharcamiento que se produce cuando hay poca pendiente, ambos procesos negativos para la vida de las plantas</p> <p>4. Capa de control de la erosión. Es un geotextil que se coloca sobre la capa de drenaje para evitar que el sustrato obstruya la capacidad drenante. Esta capa gana importancia con la pendiente del techo</p> <p>5. El sustrato o medio de crecimiento. Proporciona el espacio físico, de estructura porosa, con nutrientes, composición química y propiedades de drenaje necesarios para el crecimiento de las plantas escogidas.</p> <p>6. La capa de vegetación. Puede ser plantada artificialmente, mediante semillas, vástago o por colonización natural.</p>
Usos Típicos	<p>Regulación térmica del edificio donde se instalan. Gestión de la escorrentía en zonas residenciales y comerciales/industriales. Se pueden establecer en tejados para darles un uso recreativo</p>
Ventajas	<p>Imitan el estado hidrológico inicial antes de la impermeabilización asociada al desarrollo urbanístico.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tienen una alta capacidad de eliminación de los contaminantes atmosféricos urbanos depositados, así que mejoran la calidad del aire. - Pueden ayudar en el control de la contaminación acústica ya que la vegetación absorbe el ruido. - Suponen una mejora estética del edificio. - No ocupan un espacio "per se", están sobre construcciones ya realizadas. - Puede ser usados como espacios verdes. - Ayudan a gestionar los impactos de la isla de calor urbano.

Techos Verdes	
	<ul style="list-style-type: none"> - Aíslan térmicamente los edificios frente a temperaturas extremas.
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> Caro en comparación con los tejados convencionales. - No es apropiado en tejados inclinados. - La estructura de la azotea puede limitar la adaptación de las cubiertas vegetadas. - Se requiere de un mantenimiento de la vegetación. - En época seca requiere de un mayor cuidado y de un aporte adicional de agua. - Se requiere revisión de las juntas, por si aparecen roturas o problemas en relación con la capa impermeabilizante.
Requisitos de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> El riego es necesario durante el establecimiento de la vegetación para algunas cubiertas. - Hay que inspeccionar regularmente comprobar el estado de la flora y reemplazar las plantas donde sea necesario. - En algunos casos habrá que retirar residuos, como hojas secas.
Rendimiento	<ul style="list-style-type: none"> Reducción del caudal punta: Medio - Reducción de volumen: Alto - Tratamiento de calidad de agua: Alto - Potencial beneficio social/urbana: Bajo - Potencial ecológico: Bajo

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 11, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-9.

Diseño.

Análisis de los condicionantes de diseño.

Capacidad estructural.

Este es un punto clave a desarrollar por un especialista en estructuras, ya que no todas las viviendas podrán soportar la carga de una cubierta verde. Lo ideal es incorporar el diseño de la cubierta vegetada desde el inicio del planteamiento del edificio, para ir adecuando la estructura al peso extra al que se verá sometido el edificio.

La carga estructural sobre el tejado dependerá del tipo de cubierta verde elegida. Y el asesoramiento profesional sobre la carga que puede aguantar un tejado es siempre necesario

Hay que tener en cuenta que, para la instalación de este tipo de tejados verdes lo ideal, en edificios ya construidos, es que la cubierta sea plana de losa y esa técnica constructiva se utiliza muy poco en el AMSS. Realizar un cambio de cubierta para instalar una con vegetación puede llevar asociados cambios estructurales que también deberán ser cuidadosamente analizados. Por ello se hace más fácil que su diseño se incluya desde el inicio del proyecto de edificación.

Accesibilidad al tejado.

Como ocurre en todas las azoteas, las cubiertas verdes requieren de un cierto grado de mantenimiento, aunque sea una simple limpieza de la superficie, y, por lo tanto, es importante incluir en el diseño un fácil acceso cualquiera que sea el tipo de cubiertas.

Por motivos de seguridad lo idóneo sería la imposibilidad de caer desde ninguna parte del tejado, pero si esto no es posible, deben establecerse protocolos de protección y seguridad que impidan la caída de los operarios: protección del borde, sistemas de anclaje y medios de contención personal para que las inspecciones y labores de mantenimiento sean lo más seguras posibles.

El riesgo de incendio.

Aunque la vegetación seca sobre los techos verdes tiene potencial como foco de incendio (lo que podría parecer peligroso) experiencias en Alemania han demostrado que este riesgo es mínimo, y consideran los tejados verdes extensivos son resistentes contra los incendios si el sustrato tiene un espesor mínimo de 30 mm y un contenido inferior al 20% en peso de materia orgánica; además debe haber espacios de un metro de ancho con gravas cada por cada

40 m de techo verde y todos los elementos estructurales o de cualquier otro tipo que estén en el tejado deben estar rodeados por una franja de grava.

Pendientes del techo.

Los techos verdes pueden instalarse con cualquier elemento comercial estándar, hasta techos con 10° de pendiente pueden convertirse fácilmente en techos verdes especiales. Conforme se incrementa la pendiente de la superficie, más se complica el diseño y la instalación, además el coste también se incrementa, así como las limitaciones en los accesos. Si ésta supera los 45 grados, habrán de utilizarse las tecnologías que se emplean en los “muros vivos” o jardines verticales. En lo relativo al drenaje urbano, con mayor pendiente, menor será su rendimiento, por lo que pierde su efectividad en gestión sostenible de pluviales.

Biodiversidad.

Si el objetivo es crear un hábitat para propiciar el aumento de biodiversidad, los diseñadores necesitan conocer completamente cuáles son las características necesarias para posibilitar el desarrollo de tal biodiversidad.

Riego.

Las precipitaciones en el AMSS están muy polarizadas en dos épocas al año, por lo que ha de diseñarse un sistema de riego para los meses secos. En los tejados extensivos, puesto que no son transitables, el riego deberá ser automático.

Diseño hidráulico.

Las cubiertas verdes reducen la escorrentía que se genera en la azotea, ya que parte del agua es absorbida por la vegetación, y el caudal pico. La disminución en el caudal pico depende de la intensidad del evento pluviométrico y del nivel de saturación del sustrato justo antes de que comience a llover. Cuando el sustrato está saturado, el tiempo de concentración se acerca al de un tejado convencional, pero el caudal pico sigue siendo menor.

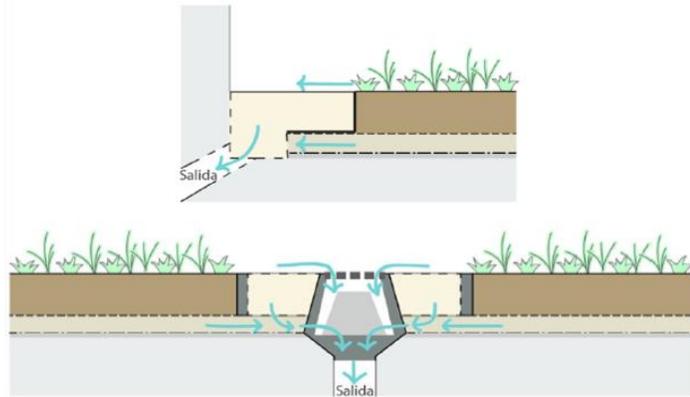
Pero, a pesar de funcionar como sistemas de drenaje, se instalan principalmente por motivos estéticos o para mejorar la climatización del edificio, el control de las aguas lluvias es algo secundario. Además, dada su ubicación, el principal objetivo del diseño no es el correcto funcionamiento hidráulico (que ha de tenerlo), sino estructural, puesto que un exceso de peso puede hacer caer abajo la construcción.

En lo relativo al estudio hidrológico, hay que analizar el funcionamiento de la cubierta vegetada frente a las precipitaciones de 5 y 10 años de periodo de retorno y 1 hora de duración y también habrá que realizar una simulación de su funcionamiento anual, es decir, evaluando los procesos de evapotranspiración y la distribución estacional de las lluvias. Hay que tener en cuenta que, en época lluviosa precipita todos los días, por lo que seguramente el sustrato estará continuamente saturado. De ahí que en el diseño deban considerarse las diferencias estacionales y adoptar la posición más conservadora, que equivale a la estación lluviosa, cuando el sustrato está completamente empapado y los niveles de evapotranspiración son más reducidos.

Además de la pluviometría, en el diseño hidráulico hay que:

- Identificar los puntos de salida.
- Calcular la escorrentía.

Fig. 29. Techo verde



Fuente: OPAMSS, Capítulo 11, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 15.

Diseño de los elementos adicionales.

Todos los soportes, perímetros del tejado, salidas y elementos salientes del tejado deben ser protegidos por una barrera no vegetada de unos 200 a 400 mm que puede ser de grava o de losetas de concreto. Esta barrera debe ser de la misma profundidad del sustrato y no menos de 500 mm en la horizontal.

La capa impermeable debe subir al menos 150 mm sobre cualquier otro elemento (sustrato o barrera de vegetación) en la parte vertical.

En los lugares donde se usa material impermeabilizante sobre las caras verticales de los soportes y parapetos, la membrana debe ir doble o con un refuerzo o protección metálica. Esto asegurará que no aparezcan puntos débiles que puedan verse afectados por radiación ultravioleta o por condiciones climáticas desfavorables en aquellas partes que no queden resguardadas por la cubierta vegetal.

Construcción.

Puesto que algunos materiales, como la lámina impermeabilizante o la capa de geotextil, han de estar en perfecto estado para su instalación, hay que prestar

especial atención a los procesos de transporte, entrega y almacenamiento por los que van a pasar. La instalación de los elementos debe ser cuidadosamente realizada ya que un posible fallo en la impermeabilización acarreará daños costosos de reparar. La plantación también habrá que hacerse conforme a los requisitos de viabilidad de las especies vegetales seleccionadas.

Finalmente, y de suma relevancia, se deben extremar las precauciones en el proceso constructivo, se trabajan con materiales pesados y generalmente a gran altura, por lo que se debe procurar que la accesibilidad y desempeño de las tareas en el techo sean seguros y eviten el riesgo de caída.

Aunque existen diferentes casas comerciales que venden e instalan materiales para este tipo de techos, el procedimiento básico constructivo es similar en todas ellas:

- 1. Impermeabilización de la cubierta.**
- 2. Colocación del geotextil que envuelve a la capa drenante.**
- 3. Montaje de la capa drenante.**
- 4. Cierre de la envolvente geotextil sobre la capa drenante.**
- 5. Colocación del sustrato en el que crecerá la vegetación.**
- 6. Plantación de las especies vegetales por semillas o planteles.**

Mantenimiento.

El mantenimiento dependerá principalmente del tipo de techo verde (intensivo/extensivo) aunque también de otros factores como de si es transitable, las horas de luz que recibe, del viento. Por lo general, los techos intensivos requieren de altos niveles de mantenimiento puesto que para mantener una vegetación frondosa se debe limpiar las malas hierbas, añadir fertilizantes, insecticidas, regarlos, podar en algunos casos. En cambio, los techos extensivos no requieren de tantos cuidados, regar en época seca y pocas tareas más.

2.6.10 Pozos de infiltración.

Cuadro 36. Aspectos generales de los pozos de infiltración.

Pozos de Infiltración	
Descripción	Los pozos de infiltración son excavaciones verticales, normalmente cilíndricas, aunque también pueden ser prismáticas, rellenas con un material poroso o huecos, que permiten infiltrar las aguas lluvias directamente al suelo en espacios reducidos. El agua sale del pozo al subsuelo no saturado, de manera que las aguas lluvias se filtran en el suelo antes de llegar al nivel del agua subterránea. Mediante los pozos de infiltración se consigue desconectar la escorrentía procedente principalmente de tejados y azoteas de la red principal, disminuyendo así el caudal a circular por la red de drenaje.
Funcionamiento	Se tienen dos funciones principales, la primera almacenar agua temporalmente en el volumen del cilindro del pozo y la segunda infiltrarla en el terreno
Componentes	<p>Capa superior.</p> <p>En la parte superior, puede ponerse tanto una capa fina de gravilla como una fina lámina de suelo con grama.</p> <p>Geotextil.</p> <p>El relleno del pozo debe estar revestido con un geotextil (tejido filtrante), compatible con las texturas del suelo circundante y los propósitos de la aplicación.</p> <p>Anillo de concreto.</p> <p>Para pozos circulares existen anillos circulares ranurados de concreto que se encajan unos sobre otros hasta alcanzar la altura de pozo deseada Medio filtrante o de acumulación.</p> <p>Puede estar compuesto de celdas plásticas o gravas, en este último caso han de permitir que el espacio de huecos sea del 40% por lo que el diámetro recomendado es entre 4 y 7,5 cm</p> <p>Pozo de observación.</p> <p>Se recomienda colocar un tubo, anclado verticalmente y con una tapa superior protectora que evite que se introduzcan elementos por él Lecho de arena.</p> <p>En el fondo del pozo de infiltración puede colocarse una capa de pocos centímetros de arena que favorece la filtración de la escorrentía a tratar</p>
Usos Típicos	Recogida de agua de zonas adyacentes a caminos, parkings, en zonas residenciales, comerciales e industriales. Pero los pozos no pueden ir cerca de estructuras subterráneas de edificios, ni cerca de laderas que pueden saturar y debilitar la misma

Pozos de Infiltración	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Atenúan de forma significativa el volumen de agua de escorrentía y laminan el caudal pico. - Se integran fácilmente en el paisaje, ya que son poco visibles. - Reducen la erosión del suelo. - Mejoran la calidad del agua de escorrentía. - Favorecen la recarga de acuíferos. - Habilitan el almacenamiento de la precipitación y aprovechamiento del agua para otros usos. - Sin restricciones topográficas para su instalación. - Ocupan poco espacio.
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de colmatación: se pueden obstruir con facilidad, por lo que no se recomiendan localizarlos en suelos particulados finos (aquellos constituidos por limos o arcillas). Las acumulaciones de contaminantes y las obstrucciones son difíciles de ver. - Limitados a pequeñas áreas drenantes. - Capacidad de almacenamiento reducida en comparación con otros SUDS. - Riesgo de colmar el subsuelo y acuífero si está cerca. - Requiere de inspecciones y mantenimiento periódicos.
Requisitos de mantenimiento	<p>Hay que inspeccionarlas para revisar posibles obstrucciones.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Retirada de sedimentos. - Retirada y limpieza de los materiales filtrantes
Rendimiento	<ul style="list-style-type: none"> Reducción del caudal punta: Medio - Reducción de volumen: Alto - Tratamiento de calidad de agua: Alto - Potencial beneficio social/urbana: Bajo - Potencial ecológico: Bajo

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 12, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-6.

Diseño.

Análisis de las condiciones de diseño.

Ubicación.

Los pozos ocupan muy poco espacio por lo que se pueden ubicar en pequeños espacios, con la superficie al aire libre o cubiertos, cerca de las áreas impermeables que drenan a ellos y respetando una distancia de seguridad con la colindancia vecinal y con cualquier construcción para no afectar a los cimientos.

Pendiente del terreno.

Al ser elementos puntuales, su limitación por las pendientes está asociada a los posibles problemas que pueda causar aguas abajo el flujo subsuperficial, no a un mal funcionamiento del sistema. Para evitar causar daños, se debe evitar su construcción en la corona de taludes y laderas.

Suelo.

La distancia al nivel freático debe estar a más de 3 m por debajo de la base de la instalación.

No deben situarse en terrenos inestables y la estabilidad del suelo debe ser verificada evaluando las condiciones del suelo y las aguas subterráneas. Tampoco son aptos para la instalación de pozos de infiltración los terrenos con suelos con una permeabilidad menor que 10^{-5} m/s. Deben permitirse drenar y volverse a airear entre los eventos de lluvia. Por lo tanto, no deben utilizarse en sitios con flujo continuo de agua.

Dimensionamiento.

El dimensionamiento de los pozos de infiltración puede realizarse tal y como se indicó previamente, teniendo en cuenta que la superficie por la que se produce la infiltración es la de los laterales del pozo, ya que el fondo suele colmatarse y perder efectividad en la infiltración.

Para el AMSS, dada las altas intensidades en breves márgenes de tiempo, es recomendable, por motivos de seguridad acercar el volumen de almacenamiento al total de escurrimiento. Esto da dimensiones un tanto mayores, pero que dejan del lado de la seguridad.

Pero en los casos en lo que esté demostrado mediante ensayo que la capacidad de la infiltración del suelo es alta y se puede realizar de manera segura, se puede refinar el balance de masas para realizar un dimensionamiento más ajustado.

Igualmente, se parte de la precipitación de diseño, 5 años de periodo de retorno y una hora de duración si se emplea como medida en origen y con un dren que

de salida para $T_r=10$ años o 10 años de periodo de retorno sin dren (aunque la instalación del dren puede valorarse para eventos extremos si la circulación del excedente es peligrosa por superficie).

Para concretar mejor las dimensiones se propone realizar el balance de masas discretizado en el tiempo. Es decir, comparar el volumen acumulado con el que se puede infiltrar en el suelo cada cierto intervalo de tiempo durante 24 horas, que es el tiempo en el que la estructura ha de quedar vacía, y el valor mayor de la diferencia entre el volumen acumulado precipitado y el infiltrado, será el tamaño mínimo que debe tener el pozo.

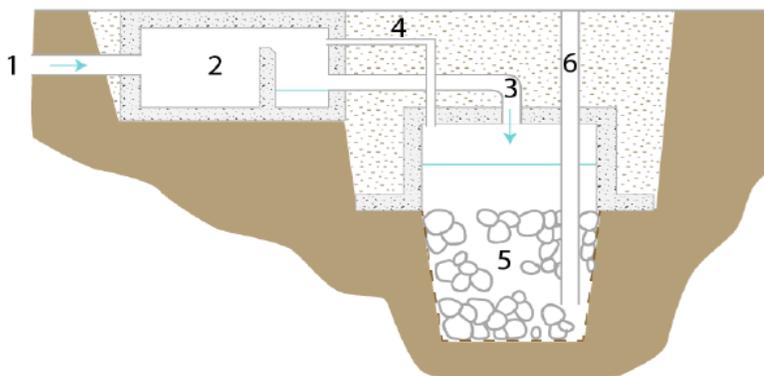
Diseño de los elementos adicionales.

Entrada al sistema.

Las entradas a estos sistemas son de tipo puntual. Pueden producirse desde la superficie o desde un tubo procedente de un pretratamiento.

Si el agua a infiltrar procede de áreas aportantes donde se acumulen partículas o sedimentos, se ha de instalar una cámara de decantación previa a la entrada en el pozo para prevenir colmataciones. Su volumen puede estimarse aproximadamente como la mitad del volumen de almacenamiento neto del pozo. También es recomendable poner un rebase, es decir, una cámara desde la que se evacúa el exceso de agua antes de que entre al pozo. Éste no debe recibir más cantidad de agua de la que le corresponde por diseño ya que así se favorece que se colmate rápidamente.

Fig. 33. Sección de pozo de infiltración con cámara de sedimentación. 1. Entrada de caudal. 2. Cámara de sedimentación. 3. Entrada de agua al pozo. 4. Respiradero. 5. Pozo de infiltración. 6. Pozo de inspección.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 12, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 9.

Tubo de control.

Se recomienda instalar un tubo piezométrico para inspeccionar el nivel de agua en el interior del pozo de infiltración. Este elemento de control puede consistir en un tubo vertical de 50 mm de diámetro, perforado, abierto en la base y envuelto en geotextil, con la parte superior externa cerrada con una tapa para evitar que se introduzcan partículas no deseadas.

Construcción.

La construcción de un pozo de infiltración no demanda de particularidades especiales, se trata de una excavación rellena por un material poroso que permite el almacenamiento de agua mientras se infiltra, arena que hace las veces de filtro y un geotextil que sirve para delimitar el pozo en el subsuelo. En caso de que el pozo sea de gran envergadura, en vez de geotextil, se emplearán anillos ranurados de concreto.

Mantenimiento.

Los pozos de infiltración requieren un mantenimiento regular para asegurar un adecuado funcionamiento hidráulico.

2.6.11 Zanjas de infiltración.

Cuadro 37. Aspectos generales de las zanjas de infiltración.

Zanjas de Infiltración	
Descripción	Trincheras de poca profundidad (1 a 3 m) rellenas de material poroso, a los que vierte la escorrentía de superficies contiguas y sirven para recoger y almacenar el agua de escorrentía hasta que se produce la infiltración de la misma al terreno natural
Funcionamiento	A ellos va a parar el agua de escorrentía procedente de las zonas adyacentes, la almacenan mientras ésta se va infiltrando en el subsuelo, ofrecen una buena gestión de los volúmenes de escorrentía, puesto que están diseñadas para infiltrar toda o gran parte del agua que les llega. El relleno poroso atrapa los sedimentos, con lo que mejora la calidad de aguas pluviales.
Componentes	<p>Capa superior.</p> <p>En la parte superior, puede ponerse tanto una capa fina de gravilla como una fina lámina de suelo con grama.</p> <p>Geotextil.</p> <p>El relleno de la zanja debe estar revestido con un geotextil (tejido filtrante), compatible con las texturas del suelo circundante y los propósitos de la aplicación.</p> <p>Medio filtrante o de acumulación.</p> <p>Puede estar compuesto de celdas plásticas o gravas, en este último caso han de permitir que el espacio de huecos sea del 40% por lo que el diámetro recomendado es entre 4 y 7,5 cm</p> <p>Pozo de observación.</p> <p>Se recomienda colocar un tubo, anclado verticalmente y con una tapa superior protectora que evite que se introduzcan elementos por él</p> <p>Lecho de arena.</p> <p>En el fondo de la zanja de infiltración puede colocarse una capa de pocos centímetros de arena que favorece la filtración de la escorrentía a tratar</p>
Usos Típicos	Recogida de agua de zonas adyacentes a caminos, parkings, en zonas residenciales, comerciales e industriales.
Ventajas	<p>Atenúan de forma significativa el volumen de agua de escorrentía y laminan el caudal pico.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se integran fácilmente en el paisaje, ya que son poco visibles. - Reducen la erosión del suelo. - Mejoran la calidad del agua de escorrentía. - Favorecen la recarga de acuíferos. - Habilitan el almacenamiento de la precipitación y aprovechamiento del agua para otros usos. - Sin restricciones topográficas para su instalación. - Ocupan poco espacio.

Zanjas de Infiltración	
Limitaciones	<p>Riesgo de colmatación: se pueden obstruir con facilidad, por lo que no se recomiendan localizarlos en suelos particulados finos (aquellos constituidos por limos o arcillas).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Las acumulaciones de contaminantes y las obstrucciones son difíciles de ver. - Limitados a pequeñas áreas drenantes. - Capacidad de almacenamiento reducida en comparación con otros SUDS. - Riesgo de colmatar el subsuelo y acuífero si está cerca. - Requiere de inspecciones y mantenimiento periódicos.
Requisitos de mantenimiento	<p>Hay que inspeccionarlas para revisar posibles obstrucciones.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Retirada de sedimentos. - Retirada y limpieza de los materiales filtrantes.
Rendimiento	<p>Reducción del caudal punta: Medio</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reducción de volumen: Alto - Tratamiento de calidad de agua: Alto - Potencial beneficio social/urbana: Bajo - Potencial ecológico: Bajo

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 13, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-5.

Diseño.

Análisis de los condicionantes de diseño.

Ubicación.

Las zanjas son elementos lineales que se pueden instalar en suelos con pendientes limitadas, aunque puede aterrarse para que no pierdan capacidad de almacenamiento. Se recomienda siempre mantener una distancia mínima con la colindancia vecinal.

Pendiente de terreno.

Están generalmente restringidas a lugares sin pendientes significativas, la pendiente longitudinal no debe exceder el 6%, ya que se requieren velocidades bajas para la eliminación de contaminantes y para promover la infiltración. El

Ec. 19. Longitud máxima de un tramo de zanja.

fondo de la zanja debe ser horizontal. Si el terreno presenta una pendiente a lo largo de la zanja, la altura de ésta es la del extremo de menor profundidad. Para no perder mucha capacidad de almacenamiento, es conveniente dividir la zanja a lo largo en tramos de longitud máxima.

$$L_{max} = \frac{H_z}{2S}$$

- L_{max} : longitud máxima del tramo (m).
- H_z : profundidad de la zanja (m).
- S : pendiente del terreno (m/m)

Suelo.

La distancia al nivel freático debe estar a más de 3 m por debajo de la base de la instalación.

No deben situarse en terrenos inestables y la estabilidad del suelo debe ser verificada evaluando las condiciones del suelo y las aguas subterráneas. Tampoco son aptos los terrenos con suelos con una permeabilidad menor que 10^{-5} m/s. Deben permitirse drenar y volverse a airear entre los eventos de lluvia. Por lo tanto, no deben utilizarse en sitios con flujo continuo de agua.

Dimensionamiento.

Se parte de la precipitación de diseño, 5 años de periodo de retorno y una hora de duración si se emplea como medida en origen y con un dren que de salida para $T_r=10$ años o 10 años de periodo de retorno sin dren (aunque la instalación del dren puede valorarse si para eventos extremos si la circulación del excedente es peligrosa por superficie).

Para concretar mejor las dimensiones se propone realizar el balance de masas discretizado en el tiempo. Es decir, comparar el volumen acumulado con el que se puede infiltrar en el suelo cada cierto intervalo de tiempo durante 24 horas

más el volumen que puede salir por un dren inmerso en el lecho de gravas para conocer el tiempo en el que la estructura ha de quedar vacía, y el valor mayor de la diferencia entre el volumen acumulado precipitado y el infiltrado y/o drenado, será el tamaño mínimo que debe tener la zanja.

Diseño de los elementos adicionales.

Entrada al sistema.

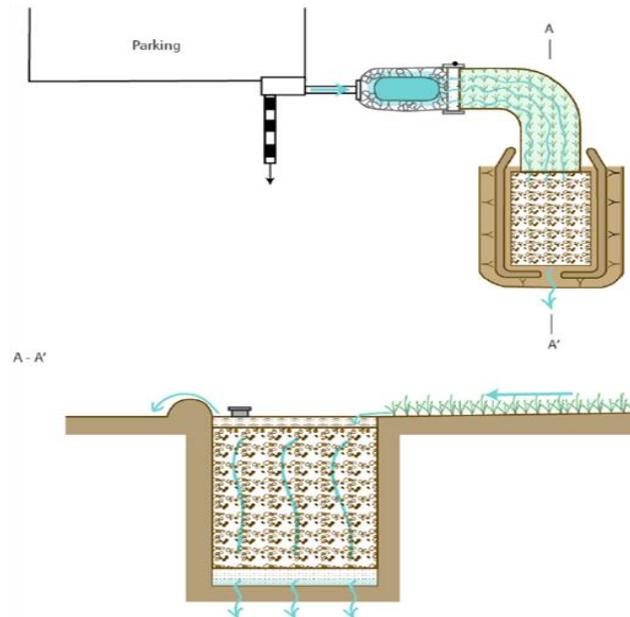
Las entradas a estos sistemas pueden ser de tipo puntual, pero se recomiendan que sean lineales. Preferiblemente por los laterales mediante una franja de grama o de grava que hace de pretratamiento.

En caso de que la entrada sea puntual en un extremo de la zanja, se puede instalar una cámara de sedimentación desde la que sale un tubo ranurado que discurre sobre la superficie de la zanja distribuyendo el caudal de entrada

Tubo de control.

Se recomienda instalar un tubo piezométrico para inspeccionar el nivel de agua en el interior de la zanja. Este elemento de control puede consistir en un tubo vertical de 50-100 mm de diámetro, perforado, abierto en la base y envuelto en geotextil, con la parte superior externa cerrada con una tapa para evitar que se introduzcan partículas no deseadas. Se deben localizar mínimo uno por zanja y para zanjas largas, 1 cada 25 metros.

Fig. 35. Planta y sección de una zanja de infiltración con pretratamiento a la entrada. Sin escala.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 13, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 3.

Construcción.

Recomendaciones en el proceso constructivo:

- Evitar los aportes de tierra, si estas estructuras forman parte de proyectos urbanísticos se deben dejar para el final del proceso constructivo del proyecto completo. También debe impedirse la entrada de escorrentía hasta que no esté completamente finalizada su construcción.
- Corroborar que las dimensiones de la zanja se corresponden con las de diseño hidráulico ya que las variaciones (aunque se mantenga el volumen de excavación) modifican el funcionamiento de la técnica.
- En caso de que se incluyan tuberías de distribución para la entrada de caudal o drenes subterráneos para la salida, se debe controlar su pendiente y alineación durante su instalación, antes de que queden totalmente tapados por el relleno de la zanja.
- Se debe verificar in situ o en laboratorio la porosidad del material empleado como lecho de almacenamiento.

- En caso de recubrimiento con filtros geotextiles, se deberá tener especial cuidado en su colocación, comprobando que no hay roturas y que recubren completamente el relleno.
- Constatar su adecuado funcionamiento hidráulico mediante ensayos de relleno con agua y observación del tiempo de vaciado.

Mantenimiento.

Las principales tareas a realizar en el mantenimiento de estos sistemas son:

- Limpieza de áreas aportantes y de los filtros o pretratamiento.
- Si hay vegetación cerca habrá que revisar que no le alcancen las raíces.
- Sustituir el geotextil en caso de rotura.
- Sacar y lavar el relleno de hacer falta.

2.6.12 Superficies permeables.

Cuadro 38. Aspectos generales de las Superficies Permeables.

Superficies Permeables	
Descripción	Son superficies que dejan pasar el agua a su través, permitiendo que ésta se infiltre por el terreno o bien sea captada y retenida en capas subsuperficiales para su posterior reutilización o evacuación. Las aguas lluvias atraviesan la superficie permeable hasta la capa inferior que sirve de reserva, atenuando de esta forma las puntas del flujo de escorrentía superficial y dejando parte de los contaminantes en suspensión allí retenidos. Este tipo de técnica de drenaje urbano sostenible puede utilizarse para áreas drenantes inferiores a 4 hectáreas con pendientes inferiores a 2 - 5%.
Funcionamiento	El agua pasa a través de la superficie hacia el material de relleno subterráneo. Esto permite el almacenamiento, tratamiento, transporte y la infiltración de agua. Estos sistemas son una aplicación excelente para la reducción de cantidad de agua. El volumen de agua almacenado depende del volumen de huecos del relleno permeable o de la sub-base, y del área y la profundidad del material de relleno. El relleno permeable o subbase atrapa los sedimentos, mejorando la calidad de aguas pluviales
Componentes	Superficie permeable. Puede ser de diferente naturaleza <ul style="list-style-type: none"> - Base. Capa granular. - Geotextil (opcional). - Sub-base - Impermeabilización (opcional), como una geolámina. - Dren de salida (opcional).

Superficies Permeables	
Usos Típicos	Se emplean en zonas con baja intensidad de tráfico, calles residenciales, zonas de aparcamiento, etc. no estando recomendados en zonas industriales, gasolineras o lugares en los que se acumulan cantidades de metales pesados importantes.
Ventajas	<p>Reducen los picos de caudal disminuyendo el riesgo de inundación aguas abajo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reducción de los efectos de la contaminación en el agua de escorrentía. - Pueden ser usados en zonas de alta densidad poblacional. - Reducción de la necesidad de realizar excavaciones profundas para colocación de sistemas de drenaje convencionales, lo que abarata costes. - Gran flexibilidad en diseño y tipos. - Se pueden usar como parte de un sistema en línea en aquellos lugares donde la infiltración del agua puede conllevar problemas. - Permiten un doble uso del espacio, por lo que no es significativa su ocupación en suelo. - Reducen o eliminan la presencia de tragantes y colectores. - Eliminan el encharcamiento superficial. - Con buena aceptabilidad por parte de la comunidad.
Limitaciones	<p>No pueden utilizarse donde haya arrastre superficial de grandes cargas de sedimentos.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Por ahora no se usan en carreteras con tráfico elevado. - A largo plazo, si no hay mantenimiento, existe riesgo de crecimiento de malas hierbas y de obstrucciones. - Poca aplicación para zonas con tráfico de vehículos pesados y/o velocidades elevadas de circulación. - Riesgo elevado de colmatación de la superficie y de fallo estructural, por lo que se requiere un correcto diseño, una ejecución de calidad y un mantenimiento adecuado a las condiciones de aporte de sedimentos y del tráfico.
Requisitos de mantenimiento	<p>El mantenimiento depende del tipo de superficie permeable, aunque hay algunas pautas generales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Barrido frecuente. - Los elementos que se eliminan de capas más profundas como hidrocarburos o metales pesados ha de seguir un tratamiento especial.
Rendimiento	<p>Reducción del caudal punta: Bueno</p> <p>Reducción de volumen: Bueno</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tratamiento de calidad de agua: Bueno - Potencial beneficio social/urbana: Bajo - Potencial ecológico: Bajo

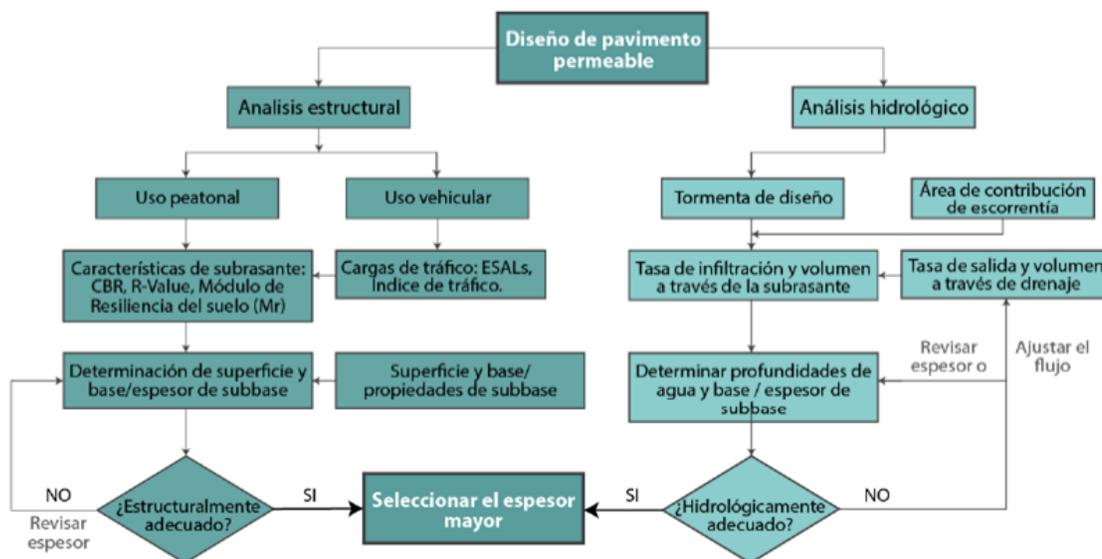
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 14, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-6.

Diseño.

Un buen diseño eficiente debe:

- Tener un buen manejo del agua.
- Soportar la carga de tráfico.

Fig. 37. Esquema para el diseño de pavimentos permeables.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 14, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 6.

Análisis de los condicionantes de diseño.

Ubicación.

Las superficies permeables son una solución idónea para parqueos, paseos peatonales, plazas, casi cualquier superficie urbana por la que no circulen vehículos pesados. Pero debe evitarse su instalación al lado de zonas con suelo suelto o que generen sedimentos susceptibles de ser arrastrados.

Pendiente del terreno.

Están generalmente restringidas a lugares sin pendientes significativas, la pendiente longitudinal no debe exceder el 5%, siendo preferible que quede por

debajo del 2%, para facilitar la captación y evitar que el agua escurra rápidamente.

Suelo.

Si se va a producir la infiltración, la distancia al nivel freático debe estar a más de 3 m por debajo de la base de la instalación. No deben situarse en terrenos inestables, por lo que previamente al diseño de estos SUDS, se han de realizar los ensayos geotécnicos que determinen la idoneidad de esta técnica.

Dimensionamiento.

El dimensionamiento hidrológico de la superficie permeable depende fundamentalmente del volumen de precipitación necesario retener y/o infiltrar.

Como medida de control en origen puede dimensionarse para un periodo de 5 años si se asegura la salida controlada para un periodo de retorno de 10 años hacia otro eslabón en la cadena de drenaje (como en el resto de las técnicas en origen, si es eslabón único o el último, se dimensionará a partir de precipitaciones de 10 años de periodo de retorno).

Además, un factor muy importante es la conductividad hidráulica de la superficie, previo al dimensionamiento, ha de conocerse ese valor, que ha de ser elevado para permitir que la lluvia intensa la pueda atravesar sin dificultad

El dimensionamiento del volumen de almacenamiento se puede realizar como se muestra:

$$V_A = V_E - V_S$$

Ec. 20. Volumen de almacenamiento.

- V_A : Volumen de almacenamiento.
- V_E : Volumen de entrada que equivale al precipitado directamente sobre la zona V_{LL} y, si recibe aportes de suelo impermeable V_{Imp} , la suma de ambos volúmenes $V_E = V_{LL} + V_{Imp}$.
- V_S : Volumen de salida del sistema.

La salida de las aguas del sistema puede ser por infiltración total (toda el agua se infiltra), por infiltración parcial (sólo se infiltra una parte) o por dren colector V_D (nada del agua se infiltra y sale conducida hacia el punto de vertido u otros sistemas de gestión de aguas lluvia).

$$V_S = V_I + V_D$$

Ec. 21. Volumen de salida.

- V_I : Volumen que se infiltra.
- V_D : Volumen que sale por dren.

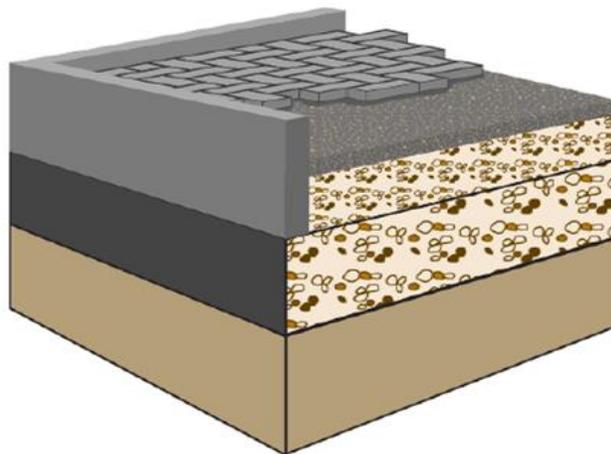
La capacidad total de almacenamiento del sistema puede incluir la capacidad de la misma superficie porosa, la de la base, la subbase (de gravas o celdas plásticas) e incluso la de una lámina de almacenamiento sobre la superficie.

$$V_A = S_P \cdot (H_{LA} + n_{SP} \cdot H_{SP} + n_{CB} \cdot H_{CB} + n_{CA} \cdot H_{CA})$$

Ec. 22. Volumen de almacenamiento en la superficie permeable.

- S_P : Superficie permeable.

Fig. 38. Sección de superficie permeable con infiltración total. En la parte superior adoquines por cuyas juntas pasa el agua, después una capa de área, subbase, capa de almacenamiento y suelo natural



Fuente: OPAMSS, Capítulo 14, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 9.

- H_{LA} : Altura de la lámina de agua sobre la superficie.
- n_{SP} : Porosidad de la capa permeable.
- H_{SP} : Altura de la superficie permeable.
- n_{CB} : Porosidad de la capa.
- H_{CB} : Altura de la capa base.
- n_{CA} : Porosidad de la capa de almacenamiento (sub-base).
- H_{CA} : Altura de la capa de almacenamiento (sub-base).

Respecto a la salida de caudal, pueden darse tres situaciones:

A. Que todo el volumen a gestionar se infiltre.

En ese caso $V_D = 0$. Como en el AMSS las intensidades de precipitación son muy altas, si consideramos despreciable la tasa de infiltración respecto al valor de los milímetros por minuto que precipitan, se puede simplificar a $V_A = V_E$, quedando:

$$V_A = V_E = S_P \cdot (H_{LA} + n_{SP} \cdot H_{SP} + n_{CB} \cdot H_{CB} + n_{CA} \cdot H_{CA})$$

Ec. 23. *Volumen de almacenamiento en la superficie permeable.*

Las porosidades de las capas vienen determinadas por el material que las constituyen. En la capa propiamente destinada a almacenar el agua se suelen emplear gravas de con el 40% de huecos o celdas plásticas que alcanzan más del 90%. Partiendo de una variable: porosidad del material a emplear, superficie máxima a ser convertida en permeable o profundidad máxima a la que se pueda trabajar; el proyectista puede estimar las demás y ajustar las dimensiones según proyecto. Una vez dimensionada la superficie permeable, se deberá comprobar que el tiempo de permanencia del agua en el sistema no permanece en él más de 24 horas.

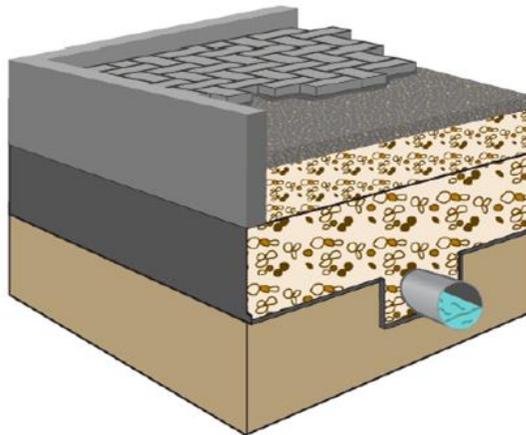
B. Que no se produzca infiltración:

Sección de superficie permeable sin infiltración.

$$V_A = V_E - V_D$$

Ec. 24. *Volumen de almacenamiento en la superficie permeable sin infiltración.*

Fig. 39. Sección de superficie permeable con lámina impermeable y dren de salida del caudal filtrado.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 14, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 10.

En suelos donde no se pueda producir la infiltración, se debe instalar un tubo dren que desagüe el volumen almacenado hacia otro sistema de gestión de pluviales o su vertido al medio.

Las superficies permeables actúan como sistemas de retención, por lo que el caudal de salida a través del dren será el factor limitante en el dimensionamiento del volumen de almacenamiento.

El caudal circulante por el tubo dren se puede calcular como:

$$Q_s = C(h - H_d)^n$$

Ec. 25. *Estimación del volumen adicional aportado por el lecho filtrante.*

En la retención, todo el volumen que entra sale, pero con un retardo en el tiempo que en este caso viene dado por las dimensiones del dren.

C. Que se produzca infiltración parcial:

En las situaciones en que la tasa de infiltración del subsuelo no sea suficiente para evacuar el sistema en menos de 24 horas, debe instalarse un dren colector, de igual manera que en el caso anterior, pero el volumen a transportar no será el total precipitado, sino la diferencia entre éste y el que se infiltra.

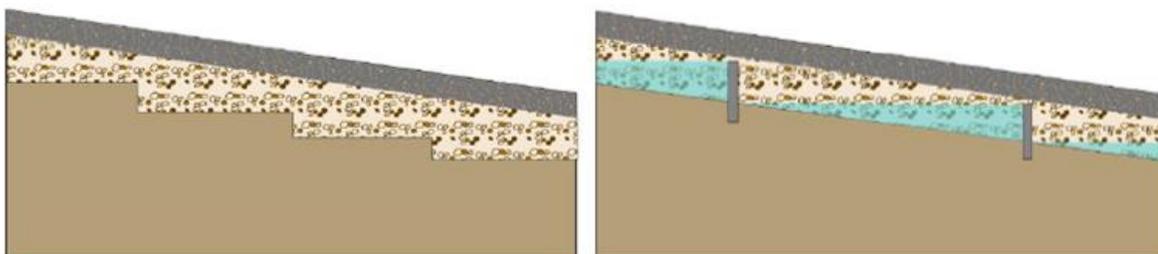
Dimensionamiento en suelos con pendiente.

En la estimación de volúmenes se ha partido de la base de que el suelo está nivelado, pero si la superficie no está nivelada, y la intensidad de lluvia es mayor que la tasa de infiltración del suelo, la porción superior de la losa no se llenará y rápidamente correrá hacia aguas abajo, de manera que parte del volumen de almacenamiento no se llena. El proyectista deberá incluir estas pérdidas de volumen en el dimensionamiento y, en sistemas de gran longitud se recomienda el uso de terracería o incluir pequeñas presas espaciadas a lo largo del tramo con pendiente, para incrementar el volumen de almacenamiento.

Construcción.

Las superficies permeables son de diferente naturaleza, por lo que los procesos constructivos pueden variar de una a otra. Pero todas, además de satisfacer los mismos requerimientos constructivos que los pavimentos tradicionales, necesitan de un control y una instalación más rigurosos para prevenir un futuro mal funcionamiento hidráulico del sistema. Este tema se puede verificar en el proceso propuesto por el ISCYC, expuesto en la Guía técnica.

Fig. 40. A la izquierda aterrazamiento del fondo y a la derecha pequeñas presas para incrementar la capacidad de almacenamiento.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 14, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 11.

Los procesos constructivos varían en si la superficie es continua, modular (bloques o losas separadas que permiten el paso del agua), con césped, con gravas.... También si el elemento de almacenamiento es solo una capa de concreto permeable, o una subbase de gravas o de celdas plásticas, ya que determinará los materiales a emplear que influyen en el proceso de instalación.

Mantenimiento.

La vida útil de las superficies permeables depende de lo que tarden en colmatarse, por ello en el proceso de diseño se deben establecer las tareas mínimas a realizar en la misma superficie y zonas adyacentes para asegurar que el pavimento no vea muy mermada su capacidad de absorber el agua. La principal acción en estos casos es la limpieza de la superficie permeable, que se puede hacer con barrido manual o mecánica (como las máquinas autopropulsadas con equipo de lavado succión trasero con agua).

2.6.13 Lagunas de infiltración.

Cuadro 39. Aspectos generales de las lagunas de infiltración.

Lagunas de Infiltración	
Descripción	Son depresiones poco profundas en el terreno cubiertas con grama que almacenan e infiltran gradualmente la escorrentía de superficies adyacentes. Su finalidad es la transformación de un flujo superficial en subterráneo, consiguiendo de paso la eliminación de contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas.
Funcionamiento	Las aguas lluvias procedentes de las zonas adyacentes alimentan a estos sistemas que las acumulan en su superficie en una lámina de poca altura mientras se va infiltrando en el terreno. Son una buena técnica a emplear para el control tanto del volumen como del caudal pico de la escorrentía puesto que al tener tamaño considerable permiten la infiltración de una gran cantidad de agua.
Componentes	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentación o punto de entrada. • Bordes o muros laterales. • Superficie plana en depresión permeable. • Rebosadero o punto de salida de emergencia.

Lagunas de Infiltración	
Usos Típicos	Gestión de la escorrentía en zonas residenciales de no muy alta densidad donde las aguas no arrastren una carga contaminante importante.
Ventajas	<p>Reduce notablemente el volumen de escorrentía.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Puede ser muy eficaz en la eliminación de contaminantes por filtración. - Contribuye a la recarga de las aguas subterráneas y el aumento del flujo base. - Sencillo y rentable de construir. - Las variaciones en su rendimiento son fácilmente visibles.
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel de fracaso potencialmente alto debido a la inadecuada ubicación, mal diseño o la falta de mantenimiento, especialmente si no se incorpora un pre-tratamiento adecuado. - Se necesitan estudios geotécnicos completos para confirmar la idoneidad para la infiltración. - No son apropiados para el drenaje de zonas donde se concentran altas cargas de contaminantes en las aguas de escorrentía. - Requieren de un área grande y plana. - No se recomiendan en terrenos rellenados
Requisitos de mantenimiento	<p>Inspecciones periódicas para detectar signos de deterioro en el rendimiento y posibles obturaciones.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Eliminación de restos y residuos. - Limpiar las entradas y salidas de agua. - Mantener en buen estado la vegetación. - Controlar el nivel de sedimentos y eliminar cuando sea preciso.
Rendimiento	<p>Reducción del caudal punta: Medio</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reducción de volumen: Bueno - Tratamiento de calidad de agua: Bueno - Potencial beneficio social/urbana: Bueno - Potencial ecológico: Bueno

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 15, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-4.

Diseño.

Los tipos de suelo, las condiciones geológicas superficiales y los niveles de agua subterránea determinan la idoneidad de los sistemas de infiltración en general y de este tipo de elemento en especial dados los mayores volúmenes que se gestionan.

Análisis de los condicionantes de diseño.

Pendiente del terreno.

No han de instalarse en lugares con pendientes superiores al 15% y el fondo ha de mantenerse de forma horizontal. Si el terreno presenta pendiente es conveniente dividir la laguna separándola en varios niveles, de manera que el agua pueda rebasar de un nivel a otro.

El fondo de la cuenca debe ser tan plano como sea posible para que el estancamiento y la infiltración de la escorrentía se produzcan de forma uniforme a través de la superficie. Las laderas laterales de la laguna no deben ser muy pronunciadas (pendiente igual o inferior a 1H:4V) para permitir el establecimiento de vegetación, facilitar los trabajos de cuidado de las plantas asentadas, el acceso para el mantenimiento y por razones de seguridad pública.

Suelo.

Las técnicas de infiltración se pueden implementar en una variedad de tipos de suelo, y se usan típicamente en suelos que van desde arenas hasta arenas arcillosas, siempre con permeabilidades medias altas. Las recomendaciones internacionales establecen valores mínimos de velocidad de infiltración de 13/15 mm/h esto es así para evitar que la técnica colapse ya que con valores más bajos la infiltración se produce un estancamiento de agua muy longevo dentro de la técnica, se requieren sistemas de mayor tamaño con un bajo rendimiento y pueden aparecer problemas de colmataciones. Por tanto, los suelos con conductividades hidráulicas inferiores a esos valores no excluyen necesariamente el uso de sistemas de infiltración, pero el tamaño del sistema requerido puede llegar a ser prohibitivamente grande, o puede requerirse un enfoque de diseño más complejo, tal como incluir un sistema de salida de drenaje lento (un dren inferior)

Área drenante.

La infiltración no se recomienda para las aguas pluviales recolectadas en sitios industriales y comerciales que puedan ser potencialmente contaminantes, como

las del parqueo (si se acumulan grasas e hidrocarburos en la superficie), pero sí aquellas que se generan en techos y áreas donde no se depositan residuos.

El área drenante ha de ser inferior a las 10 hectáreas y la ocupación en planta ha de ser entre un 2% y un 3% del área aportante, y nunca inferior a la mitad de la superficie impermeable.

Fig. 41. Pequeña área de infiltración en un parque.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 15, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 6.

Dimensionamiento.

Se trata de determinar la superficie y profundidad de la laguna tal y como viene especificado anteriormente. Pero considerando el área aportante como la suma de las superficies impermeables que drenan hacia la laguna, más el área de la misma propiamente (ya que sobre ella también se reciben aguas lluvias).

En lo referente a la precipitación de diseño, si es una Sistema para control en origen (infiltra el agua procedente de una cubierta de un edificio, por ejemplo), se puede emplear un $Tr=5$ años y una hora de tormenta con el dimensionamiento

controlado de la salida del excedente para $T_r=10$ años. Para el resto de las ubicaciones en la cadena de gestión, el T_r mínimo será de 10 años.

Conocida el área de infiltración se puede hallar la altura que alcanzará la lámina de agua como:

$$H_L = \frac{V_{almacenado}}{A_L}$$

Ec. 26. *Estimación de la altura que tendrá la lámina de agua.*

- H_L : Altura de la lámina de agua.
- $V_{almacenado}$ Volumen de agua a almacenar en superficie para su infiltración.
- A_L : Área de infiltración de la laguna.

Hay que tener en cuenta que las alturas de agua almacenadas temporalmente en estas lagunas han de estar en el orden de 5 a 10 cm, incluso cuando operan a plena capacidad.

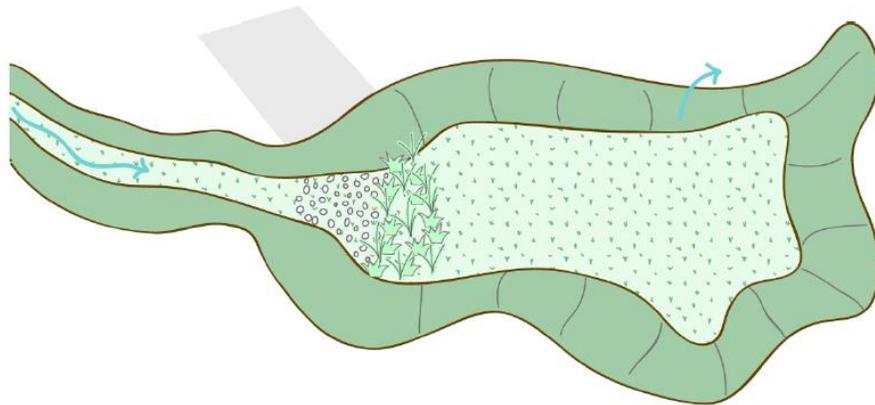
Y también, el tiempo de vaciado del Sistema, que no debe superar las 24 horas:

$$T_V = \frac{V_{almacenado}}{A_L \cdot C_S \cdot K_L}$$

Ec. 27. *Estimación del tiempo en que tarda en vaciarse la laguna.*

- $V_{almacenado}$: Volumen de agua almacenada para su infiltración.
- A_L : Área de infiltración de la laguna.
- C_S : Coeficiente de seguridad.
- K_L : Permeabilidad del suelo (m/h).

Fig. 42. Vista en planta de una laguna de infiltración, el agua entra por una cuneta verde, pasa por gravas y vegetación donde precipitan sólidos y se almacena sobre la superficie plana, Tiene preparado un acceso en gris para el mantenimiento.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 15, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 8.

Diseño de los elementos adicionales.

Entrada al Sistema.

La laguna puede recibir agua de forma puntual (desfogue de un canal o de un tubo), para lo cual habrá que protegerla mediante canal de grava, evitando así entradas a altas velocidades. También puede entrar de forma difusa a través de las pendientes laterales.

Salida del Sistema.

Se debe considerar un rebosadero o aliviadero, para evacuar aguas debajo de forma segura caudales mayores que los de diseño. Este punto de salida puede consistir simplemente en un rebaje en uno o dos puntos del talud que contiene la lámina de almacenamiento a una altura determinada, para evitar el estancamiento de volúmenes superior al de diseño.

Construcción.

La construcción de una laguna de infiltración se realizará después de que la zona de emplazamiento haya sido estabilizada para minimizar el riesgo de fallo por la acumulación de sedimentos. Se debe verificar además que los taludes de la laguna cumplan con los criterios de diseño.

Toda excavación y nivelación debe realizarse por equipos que ejerzan presiones muy ligeras para evitar la compactación del suelo de la laguna, lo que reduciría su capacidad de infiltración.

Antes y después de la construcción, se deben evitar el trasiego de vehículos sobre la superficie infiltrante. El uso de equipo pesado provoca la compactación de los suelos, lo que da como resultado una capacidad de infiltración reducida.

La base del estanque debe ser cuidadosamente allanada de forma uniforme sin ondulaciones significativas. Después del allanamiento final de la superficie, ésta se debe trabajar en un espesor de 150 mm para proporcionar una textura superficial bien aireada y porosa.

El material empleado para el relleno en estructuras de entrada y salida debe ser controlado para minimizar problemas de erosión y posterior sedimentación. Las capas superficiales utilizadas en las laderas laterales deben ser suficientemente fértiles, porosas y con bastante profundidad para asegurar el crecimiento de la vegetación.

Mantenimiento.

El mantenimiento regular es fundamental para el funcionamiento exitoso de las cuencas de infiltración. Las recomendaciones de operación y mantenimiento incluyen:

- Tras la finalización de la obra (o en caso de modificarse), vigilar que durante las primeras puestas en marcha el agua se drene en el tiempo definido en el diseño.

- Inspeccionar que el agua se infiltre completamente tras la tormenta y manejar la vegetación de forma adecuada para evitar que aparezcan encharcamientos donde puedan proliferar mosquitos.
- Programar inspecciones semestrales en el inicio y fin de la estación húmeda para evitar problemas potenciales como la erosión de las pendientes laterales de la cuenca.
- Retirar la basura acumulada y los desechos en la cuenca al comienzo y al final de la estación húmeda.
- Inspeccionar el agua estancada al final de la estación húmeda.
- Recortar la vegetación al comienzo y al final de la estación húmeda para evitar el establecimiento de vegetación leñosa y por razones estéticas y de vector.
- Quitar el sedimento acumulado cuando su volumen exceda el 10% de la laguna.

2.6.14 Cunetas verdes.

Cuadro 40. Aspectos generales de las cunetas verdes.

Cunetas verdes	
Descripción	Son canales lineales de transporte de caudal, cubiertos con grama, de base ancha, superior al medio metro y taludes con poca pendiente. Deben generar bajas velocidades en el agua circulante para que las partículas en suspensión puedan sedimentarse y no aparezcan problemas de erosiones. Adicionalmente pueden permitir la infiltración
Funcionamiento	Las cunetas verdes imitan el régimen de drenaje natural al permitir que el agua escurra a través de la vegetación, disminuyendo el caudal gracias a que facilitan el proceso de filtración. Las cunetas verdes son eficaces en la eliminación de sólidos contaminantes a través de filtración y sedimentación. La vegetación atrapa las partículas orgánicas y minerales que se incorporan al suelo, mientras que los nutrientes se eliminan por la absorción biológica.
Usos Típicos	Gestión de la escorrentía en zonas residenciales y comerciales/industriales. Se pueden establecer sustituyendo a las convencionales en carreteras.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Fáciles de incorporar en el paisaje. - Buena eliminación de contaminantes urbanos. -Reducen el coeficiente de escorrentía y los volúmenes de agua generados. - Tienen Bajo costo. - Su mantenimiento puede ser incorporado en la gestión general del paisaje urbano. - Fácil de detectar fallos o acumulaciones de sedimentos indeseadas.

Cunetas verdes	
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> -No son aptas en zonas con mucha pendiente. - la opción de poner árboles para tratarlas como zonas ajardinadas está muy limitada o No es conveniente. - Existe Riesgo de bloqueo en la conexión con el colector de salida.
Requisitos de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminación de residuos y cualquier elemento que obstruya la circulación del agua- Cortar periódicamente la hierba y eliminar los restos. - Limpiar las entradas a las alcantarillas de desechos y sedimentos. - Reparar las áreas erosionadas o dañadas.
Rendimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del caudal punta: Medio - Reducción de volumen: Medio - Tratamiento de calidad de agua: Bueno - Potencial beneficio social/urbana: Medio/Bueno - Potencial ecológico: Medio

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 16, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-5.

Diseño.

Las cunetas verdes son canales lineales de transporte de caudal, cubiertos con grama, de base ancha, superior al medio metro y taludes con poca pendiente. Deben generar bajas velocidades en el agua circulante para que las partículas en suspensión puedan sedimentarse y no aparezcan problemas de erosiones.

Análisis de los condicionantes de diseño.

Antes de proceder a la incorporación de una cuneta verde en un proyecto, hay que conocer los requerimientos mínimos para que su funcionamiento pueda cumplir con los objetivos de diseño.

Área drenante.

La extensión máxima a drenar por una cuneta verde está en torno a las dos hectáreas, áreas mayores pueden aportar una cantidad de sedimentos que puede alterar el desempeño de ésta.

Pendiente del terreno.

No se recomienda que se instalen con pendientes superiores al 5% para que cumplan con éxito las funciones de retención, y eliminación de contaminantes por sedimentación. Lo ideal es que la pendiente se mantenga entre el 0, 1 y el 2%

para que cumpla con las funciones de retardo y tratamiento de la escorrentía. En el AMSS las pendientes son más elevadas, en esos casos el proyectista ha de diseñar la cuneta con una pendiente inferior al 5% para lo que pueda dividirla en tramos conectados con saltos.

Suelo.

Si las pendientes no son altas y el suelo es idóneo para la infiltración, lo que se habrá comprobado previamente mediante ensayos en el terreno, se puede proceder a infiltrar, en cuyo caso pueden ponerse pequeñas represas que almacenen el agua temporalmente facilitando su percolación por el terreno. Estas represas se recomiendan también cuando la pendiente donde vaya la cuneta verde sea superior al 3%.

Geometría de la cuneta.

Las cunetas verdes pueden tener secciones triangulares, trapezoidales o parabólicas (las rectangulares no se aconsejan por la dificultad en su mantenimiento y estabilidad). Los canales trapezoidales son los más frecuentes y los parabólicos los que mejor funcionan frente a la erosión. Se recomienda minimizar las pendientes laterales, sin que tengan una inclinación mayor de 3H:1V.

La anchura de la cuneta no debe ser superior a los 2.5 metros, salvo que se utilicen medidas estructurales para asegurar la propagación uniforme del flujo. El ancho recomendado está entre los 0.6 y los 2.4 metros.

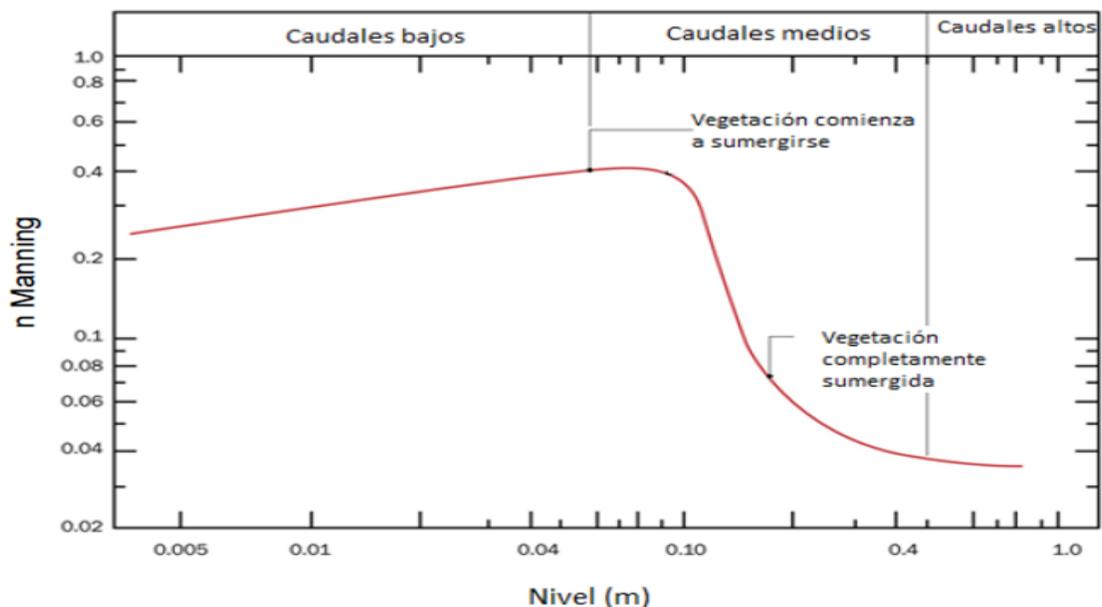
Hidrológicos.

Este tipo de elementos pueden ser parte de una urbanización o del drenaje longitudinal de un vial o carretera. En ese último caso, habrá que tener en cuenta lo dispuesto por la entidad competente ambiental, el MARN, que para este último caso especifica en la "Guía de Estudios Hidrológicos e Hidráulicos", que el periodo de retorno a emplear para el dimensionamiento es de 20 años.

Si en la zona de proyecto hay zonas naturales que por su localización y pendiente puedan ejercer de cauce natural, pueden aprovecharse para su empleo como cuneta verde, manteniendo así los caminos naturales del agua. Cumpliendo con el Reglamento de OPAMSS en su artículo V.13.

Los coeficientes de escorrentía empleados variarán en función de la vegetación presente en la cuneta. En el caso de que sea grama, estudios experimentales para pendientes del 5% muestran los valores representados en el siguiente gráfico:

Fig. 45. Valores de "n" de Manning para cunetas verdes.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 16, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 8.

Dimensionamiento.

Debido a la tendencia a disminuir la capacidad de transporte, estos canales deben diseñarse un poco sobredimensionados, por motivos de seguridad se recomienda diseñar con un resguardo mínimo del 20%.

Con el empleo de la ecuación de Manning, se puede calcular la velocidad del flujo en el canal.

$$v = \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} \cdot \frac{l^{0.5}}{n}$$

Ec. 28. Ecuación de Manning para la estimación de la velocidad de flujo.

- v : Velocidad media del flujo (m/s).
- A : Área de la sección del flujo (m²).
- P : Perímetro mojado (m).
- l : Pendiente longitudinal de la calle (m/m).
- n : Coeficiente de rugosidad de la superficie.

En el caso de que la cuneta lleve asociada bajo la superficie una zanja de gravas como almacenamiento, hay que añadir el volumen útil extra que supone.

Ese volumen extra es igual a:

$$V_A = L_C \cdot A_C \cdot H_Z \cdot P$$

Ec. 29. Estimación del volumen adicional aportado por el lecho filtrante.

- V_A : Volumen útil de almacenamiento.
- L_C : Longitud de la cuneta.
- A_C : Ancho de la cuneta.
- H_Z : Altura de la zanja.
- P : Porosidad del material de relleno, valores típicos 0.3, 0.4.

En caso de que se pueda producir la infiltración, la zanja irá envuelta en un geotextil. Conocidas L_C y A_C se deberá determinar H_Z (conocida la capacidad de infiltración del suelo.) para que la zanja haya desaguado en 24 horas.

De no producirse la infiltración, el perímetro de la zanja en contacto con el suelo irá recubierto de una geomembrana impermeabilizante e, inmerso en las gravas, se dispondrá de un tubo dren que será el medio por el que salga el caudal

Ec. 30. Caudal circulante por el tubo dren.

almacenado y que por tanto determinará, la altura que ha de tener la zanja. El caudal circulante por el tubo dren se puede calcular como:

$$Q_s = C(h - H_d)^n$$

- Q_s : Flujo de salida (mm/hr).
- h : Altura total del agua almacenada (mm).
- H_d : Es la altura del desagüe, o diámetro del tubo dren de salida.

El coeficiente C y exponente n determinan la tasa de flujo a través del desagüe en función de la altura del agua almacenada por encima de la cota del desagüe. Para los drenes, que captan el agua a través de ranuras, se considera que éstas actúan como orificios dando al exponente un valor de 0.5 y al coeficiente de drenaje 60,000 veces la relación del área total de ranuras respecto a la del SUDS.

Diseño de los elementos adicionales.

Entrada de flujo.

Las entradas de caudal en la parte superior de las cunetas verdes deben estar provistas con disipadores de energía, como por ejemplo una franja de grava. Si la entrada se produce desde un colector subterráneo, previamente se puede hacer pasar la escorrentía por una cámara de decantación para eliminar los gruesos.

Salida de la escorrentía.

Es recomendable que las salidas o puntos de desfogue también lleven una protección de gravas.

Aliviadero de emergencia.

En caso de que las cunetas transporten escorrentía a nivel de control regional, es recomendable que se incluyan salidas de emergencia para los caudales superiores a los de diseño. Éstas pueden ser tipo vertedero de pared gruesa para que cuando se exceda el caudal de diseño, el agua circule por otra vía de manera

que no ponga en riesgo la seguridad y salud de las personas y no comprometa la integridad de la misma cuneta.

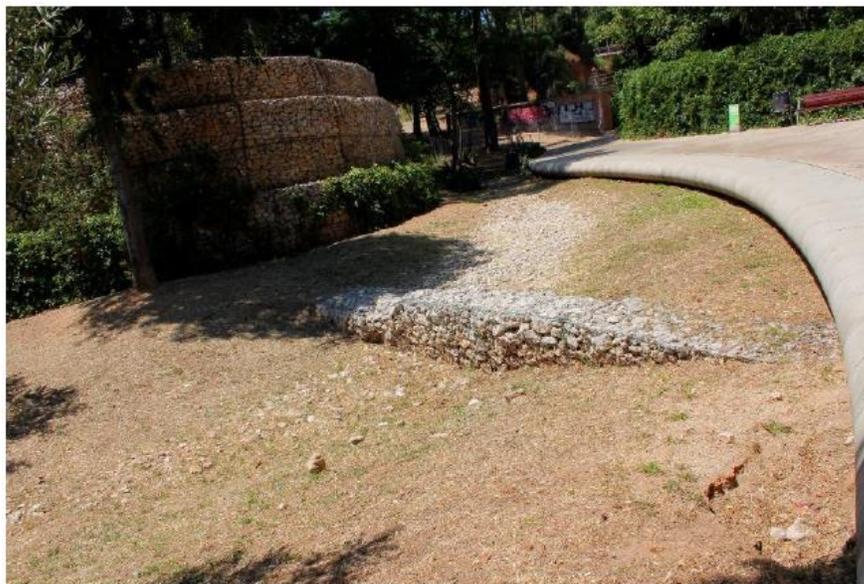
Acceso para mantenimiento.

En el diseño de estos elementos hay que tener en cuenta que necesitarán de revisiones y reemplazo de vegetación, por lo que el proyectista ha de contemplar los posibles pasos para que los operarios puedan realizar su trabajo correctamente y de forma segura.

Represas.

Los diques o represas están recomendados para aquellas cunetas vegetadas que tengan pendientes longitudinales superiores al tres por ciento (evitando así altas velocidades del agua y erosiones) o cuando se desea una detención adicional del flujo para facilitar la infiltración.

Fig. 46. Represa en cuneta verde.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 16, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 11.

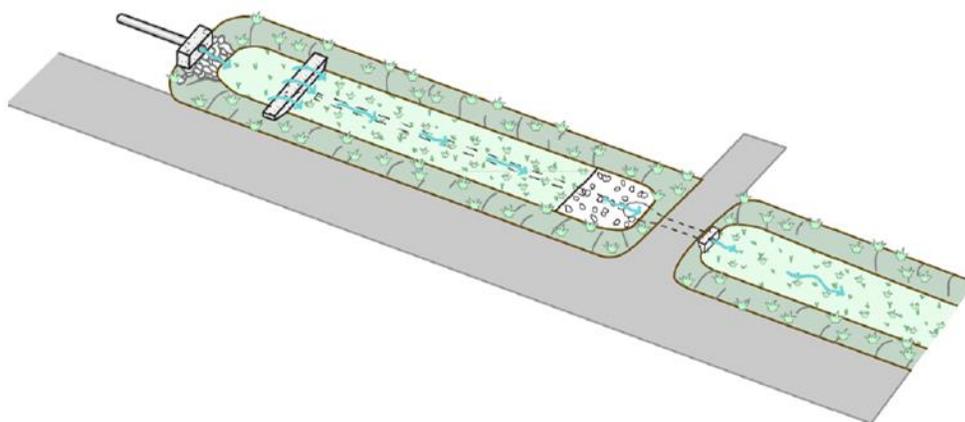
Su altura ha de ser de entre 15 y 45 cm, no ha de exceder de la mitad de la profundidad de la cuneta y deben ir regularmente espaciados. Esta separación dependerá de la pendiente de la cuneta, y de su altura para proporcionar el volumen de calidad requerido.

Para prevenir su arrastre, las represas han de estar correctamente ancladas. El lado aguas abajo de las represas de control necesita ser protegido de la erosión con escollera.

Otras consideraciones de diseño.

Se pueden emplear tubos para mantener la conectividad de las cunetas verdes en aquellos puntos donde se prevea una interferencia con una estructura. La tubería conectora debe tener capacidad suficiente para permitir el paso de caudal de diseño de la cuneta.

Fig. 47. Esquema en planta de la continuidad de una cuneta verde, el agua entra por un colector, por lo que la estrada se protege con escollera, la salida hacia otro colector también se protege para evitar erosiones, un colector deja pasar el agua de una cuneta verde a otra, pero ha de tener capacidad suficiente para el caudal de diseño de la cuneta.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 16, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 12.

Se ha de considerar la estética del lugar donde se van a emplazar las cunetas verdes e intentar acoplarse lo mejor posible al paisaje.

A la hora de escoger la vegetación, se deben elegir plantas que puedan soportar una velocidad relativamente alta de flujo a la entrada, y que puedan subsistir tanto en periodos húmedos como en secos, como las gramíneas expuestas anteriormente en la *Caracterización de la zona de estudio*.

Construcción.

El inicio de la construcción de cualquier cuneta verde o vegetada no debe realizarse hasta que la pendiente del lugar de emplazamiento haya sido estabilizada y se hayan tomado las medidas necesarias para controlar la erosión y deposición de sedimentos temporalmente. Para ello debe impedirse la entrada de la escorrentía de las zonas adyacentes hasta que la cuneta no esté completamente ejecutada y la vegetación esté completamente arraigada. Esto se puede realizar:

- **Desviando el flujo de agua hasta que la vegetación esté bien enraizada.**
- **Colocando una lámina de control de la erosión sobre la semilla recién plantada**
- **Iniciar su construcción con suficiente antelación a la época de lluvias para que la grama haya podido establecerse.**

Se debe evitar la excesiva compactación del suelo, para ello los equipos de excavación han de operar desde uno de los laterales de la cuneta y nunca hacerlo desde su interior.

Si uno de los objetivos es la infiltración, hay que cuidar el proceso de excavación, evitando compactar el suelo (de ser así, se deberá sustituir el terreno compactado y reemplazado con una mezcla de suelo y arena para promover la infiltración y el crecimiento biológico). Esto tiene como fin penetrar en la zona de compactado y promover la aireación y la formación de macroporos.

Después de un primer allanamiento del terreno realizado, debe afinarse ya que es muy importante el correcto estado de la superficie sin salientes ni otros

elementos que puedan comprometer la capacidad de circulación del agua o provocar erosiones.

Mantenimiento.

El mantenimiento y las inspecciones regulares son importantes para que las cunetas verdes funcionen correctamente a lo largo de toda su vida útil. Por ello es importante que en la fase de diseño se establezcan los accesos necesarios para poder llegar a todas las áreas de la cuneta de manera que sea fácil hacer las revisiones. Y en esa fase inicial también se deben identificar las necesidades específicas de mantenimiento e inspecciones, y establecer el programa o planificación con la que se realizarán estas acciones.

2.6.15 Áreas de Bioretención.

Cuadro 41. Aspectos generales de las áreas de bioretención.

Áreas de Bioretención	
Descripción	Son sistemas diseñados principalmente para el control de la calidad del agua antes de su vertido al medio ya que su capacidad para el control de caudales es más limitada. El alto rendimiento que tienen en la eliminación de contaminantes se debe a la variedad de mecanismos presentes (procesos físicos, químicos y biológicos).
Funcionamiento	Un área de bioretención captura la escorrentía superficial y permite que el agua se infiltre a través de las diferentes capas que la componen. A medida que el agua se infiltra, los contaminantes se eliminan a través de una variedad de mecanismos que incluyen la adsorción, la actividad microbiana, la absorción por parte de las plantas, la sedimentación y la filtración. Los sistemas de bioretención son de los más efectivos en el tratamiento de la calidad de las aguas de escorrentía urbana, ya que en ellos tienen lugar una amplia gama de mecanismos que ayudan a la descontaminación. Este tipo de sistemas suelen ofrecer un aumento del valor paisajístico donde se integran dado que proveen de vegetación.
Componentes	<ul style="list-style-type: none"> -El pretratamiento (opcional). - La zona de entrada de escorrentía. - Zona de almacenamiento superficial (área de acumulación). - Mezcla de suelo para la bioretención. - Vegetación. - Almacenamiento adicional en capa de grava con desagüe inferior. - Punto de salida del agua por desbordamiento.

Usos Típicos	Gestión de la escorrentía en zonas residenciales y comerciales. Esta técnica trata la escorrentía de extensiones de como mucho 2 hectáreas, si se quiere tratar una superficie mayor, es recomendable usar varias áreas de bioretención y dividir dicha superficie Son superficies ajardinadas en depresión que además pueden tener otros usos como islas en estacionamientos, medianas de carretera o de funcionalidad estética en calles.
Ventajas	-Reducen la escorrentía, es recomendable en zonas muy impermeables, como las áreas de aparcamiento. - Elimina sedimentos finos, metales pesados, bacterias, nutrientes y materia orgánica. - Su diseño es flexible, hay varias opciones según diferentes condiciones que pueden darse. - Son estéticamente atractivas.
Limitaciones	-No son apropiadas en zonas con pendientes superiores al 15%. - Las altas cargas de sedimentos pueden causar problemas, se recomienda algún tipo de pretratamiento. - Flujos concentrados pueden necesitar una consideración especial en el diseño.
Requisitos de mantenimiento	Mantenimiento de rutina de zonas ajardinadas, eliminación de malas hierbas y retirada de restos de poda y de plantas muertas. - Control de los sedimentos en la zona de césped.
Rendimiento	Reducción del caudal punta: Medio - Reducción de volumen: Medio (alto con infiltración) - Tratamiento de calidad de agua: Bueno - Potencial beneficio social/urbana: Bueno-Potencial ecológico:Medio

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OPAMSS, Capítulo 17, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, año 2020, pág. 1-6.

Diseño.

El diseño de un sistema de bioretención es flexible y puede variar en complejidad en función de las condiciones del lugar donde se va a implantar, su topografía, los requerimientos de volumen de escorrentía a tratar, las características del suelo, si la ubicación es residencial o no, etc.

Pero, en cualquier caso, a la hora de realizar el diseño se deben contemplar todos aquellos aspectos que pueden influir en el funcionamiento de los sistemas de bioretención para procurar que tengan el rendimiento más alto posible, que las necesidades de mantenimiento sean mínimas y la vida útil de la técnica sea lo más longeva posible.

Deben ser capaces de drenar toda el agua almacenada en unas 24 horas, por si se repite el evento pluviométrico, que tengan capacidad de tratar esa nueva escorrentía generada.

El diseño debe velar por que el área de bioretención sea fácilmente accesible para las labores de mantenimiento.

El proyectista habrá de tener muy en cuenta, aparte de las condiciones técnicas, las estéticas, sobre todo si el sistema de bioretención se va a insertar en un jardín o dentro de un espacio recreativo público.

Análisis de los condicionantes de diseño.

Ubicación.

Tradicionalmente las áreas de bioretención demandan del 5 al 10% de la superficie del área drenante. Aunque ocupen una porción tan significativa, con un buen diseño pueden ser incorporadas adecuándose perfectamente en el paisaje, por ejemplo, en zonas altamente urbanizadas se podrá ubicar estos sistemas donde los arriates y espacios verdes dada su similitud visual, evitando gastar otros espacios públicos.

Pendiente del terreno.

Las áreas de bioretención pueden usarse en la mayoría de las condiciones del suelo, aunque tienden a ser difíciles de incorporar dentro de cuencas con pendientes pronunciadas, superiores al 10%, pueden construirse escalonando el suelo para repartir bien el peso del sistema mojado y evitar problemas estructurales. Donde no deben usarse para infiltrar las aguas de escorrentía es en aquellos lugares donde la infiltración puede causar problemas de estabilidad en las pendientes como, por ejemplo, en zonas de deslizamientos o en la parte superior de un terraplén. También se deben evaluar cuidadosamente los efectos de almacenamiento de agua sobre la capacidad estructural de los suelos subyacentes antes de su emplazamiento sobre ellos.

Suelo.

Si se va a producir la infiltración, la distancia al nivel freático debe estar a más de 3 m por debajo de la base de la instalación. No deben situarse en terrenos inestables, por lo que previamente al diseño de estos *SUDS*, se han de realizar los ensayos geotécnicos que determinen la idoneidad de esta técnica.

Dimensionamiento.

El volumen necesario de almacenamiento es el correspondiente al generado en el área de aportación para la tormenta de diseño, 10 años y una hora de duración, pero si se trata de un sistema de infiltración de control en origen puede emplearse una tormenta de 5 años y una hora de duración con una salida funcional para el periodo de retorno de 10 años.

Conocido el volumen necesario a tratar, la disponibilidad de superficie para su instalación y las porosidades de los diferentes lechos porosos (desde el 40% de gravas a más del 90% de las celdas plásticas prefabricadas), el proyectista establecerá la profundidad que ha de tener el sistema.

Y, conocida ésta, deberá comprobar que, para esa superficie, altura, y capacidad hidráulica del material poroso seleccionado, el sistema de bioretención es capaz de vaciarse en 24 horas para dar cabida a la siguiente tormenta. Se puede realizar con una primera estimación a partir de la ecuación:

$$A_S = \frac{V_E \cdot L}{k(h + L)t}$$

Ec. 31. *Estimación del área mínima que ha de tener el sistema de bioretención.*

- A_S : Área superficial del material filtrante (m²).
- V_E : Volumen de escorrentía que entra al sistema (m³).
- L : Altura de la matriz porosa (m).
- h : Altura de la lámina de agua encima de la matriz (m).
- k : Coeficiente de permeabilidad de la matriz porosa (m/s).
- t : Tiempo de percolación del agua a través de la matriz porosa (segundos).

La ecuación supone que todo el volumen de almacenamiento está en el mismo medio poroso, pero en realidad, parte se acumula sobre la superficie del sistema, parte en la depresión generada a tal fin, parte en la mezcla de suelo y parte en la capa de gravas o celdas plásticas prefabricadas. La depresión superficial donde se acumula la lámina de agua puede ir de 10 a 45 cm, dependiendo de varios factores, como la disponibilidad de espacio, la capacidad de las plantas para estar sumergidas, las profundidades potenciales de trabajo o la extensión total del sistema de bioretención.

Para refinar el dimensionamiento, sobre todo en aquellos sitios donde hay mucha limitación espacial, se puede ajustar los volúmenes de almacenamiento en las tres capas y comprobar el tiempo de evacuación:

- **Almacenamiento superficial (lámina de agua en la depresión).**
- **Almacenamiento en mezcla de suelo (que será un 30% o el porcentaje de vacíos del volumen total del suelo).**
- **Almacenamiento en gravas o celdas plásticas prefabricadas (que será entre un 40%-90% del volumen total de esta capa).**

El volumen total almacenado será la suma de los tres.

La profundidad de la mezcla de suelo debe estar entre los 10 y 120 cm en función del tamaño de las raíces a emplear. Si se van a utilizar arbustos leñosos (sólo con infiltración, puesto que las raíces pueden romper la geomembrana), la profundidad media del suelo deberá incrementarse, en función de las necesidades de enraizamiento.

Fig. 50. Ejemplo de zona de bioretención de forma irregular.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 17, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 13.

La profundidad del lecho de almacenamiento debe ser de 10 cm mínima. Teniendo en cuenta que esta capa proporciona un mayor volumen de almacenamiento que la mezcla de suelo, por limitaciones de espacio, puede alcanzar alturas mayores que la capa superior.

En caso de que en el suelo no se pueda producir la infiltración, el empleo del dren es obligatorio para dar salida al volumen almacenado y se calculará según lo especificado previamente para que pueda evacuar todo el caudal almacenado en unas 24 horas para dar cabida a la siguiente tormenta

Diseño de los elementos adicionales.

Entrada del agua y pretratamiento.

Debe ser diseñada para evitar la erosión dentro del área de bioretención. Algunos ejemplos de entradas que evitan este problema son: secciones con

ensanchamientos con gramas o gravas que propician la entrada del flujo en forma laminar.

Aparte de las gravas la grama, como pretratamiento pueden emplearse pavimentos permeables e, incluso, cámaras de decantación. En este caso el agua ha de entrar mediante colector cerrado en vez de directamente desde la superficie, por lo que se debe proteger el perímetro para que no entre escorrentía de zonas adyacentes.

Fig. 51. Ejemplo de entrada con colector.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 17, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 14.

Puede ser de varios tipos, aunque lo más común es instalar un tubo vertical con ranuras a partir de cierta altura, que se corresponde con la de máxima almacenaje de agua. Puesto que estos sistemas tienen mucha versatilidad en su forma y diseño, las salidas de emergencia pueden ser de diversas clases (vertederos, canales etc.).

Mezcla de suelo para la bioretención.

Tiene que ser capaz de soportar una cubierta vegetal en buen estado, para ello se les debe añadir material orgánico compostado hasta que alcance una proporción de entre un 5 y un 10%. Puede agregarse materia orgánica adicionalmente para aumentar la capacidad de retención de agua. Las características del suelo a emplear se pueden ver previamente en la parte de *Modelo Conceptual*.

Vegetación.

Es esencial para que las zonas de bioretención sean eficaces. Tradicionalmente, la vegetación autóctona de llanuras aluviales o de prados húmedos es la que mejor se adapta a las condiciones ambientales presentes en las áreas de bioretención, pero no siempre se pueden disponer, en el AMSS por ejemplo no se puede extraer vegetación de la naturaleza para plantar en propiedades particulares ya que está protegida. Por ello lo idóneo es recurrir al listado de plantas proporcionado anteriormente o recurrir a expertos botánicos que puedan asesorar en la selección de la vegetación.

Construcción.

Si se va a construir cualquier tipo de área de bioretención en una nueva zona urbana, debe realizarse al final. Cuando se desarrolla una nueva urbanización siempre se generan escombros y sedimentos que pueden perjudicar a la vegetación presente y es por ello que la construcción de estos sistemas debe ser dejada para el final. Además, dada la importancia que tienen las plantas que forman parte de estas áreas, hasta que no estén perfectamente arraigadas y compongan un tapiz vegetal frondoso no han de recibir agua de escorrentía, para evitar problemas de erosiones. Así que al poco de ser construidas, estas áreas deben ser protegidas de la escorrentía de las zonas colindantes hasta que las plantas estén completamente establecidas.

Para minimizar el riesgo de fracaso prematuro del sistema, durante la construcción, hay que tener especial cuidado: No se deben compactar ni la mezcla de suelo de bioretención, ni los lechos de grava o arena ni tampoco el suelo que hay subyacente. Uno de los procesos que se da en estos sistemas es la infiltración, que puede verse muy limitada con la compactación del suelo y los otros componentes.

Para realizar la excavación pueden emplearse retroexcavadoras, pero teniendo cuidado no pase por encima del área de bioretención establecida para evitar las compactaciones.

Si aparecen (por el motivo que sea) erosiones tras las excavaciones, éstas han de ser rellenadas. Antes de la instalación de las membranas geotextiles hay que revisarlas para que no tengan desgarros ni roturas.

Secuencia típica construcción.

A continuación, se lista una secuencia típica básica en la construcción de un sistema de bioretención:

Fase previa o de preparación.

Las superficies donde se van a implantar estos sistemas deben estar claramente marcadas antes de comenzar cualquier trabajo para evitar la alteración y compactación del suelo en la construcción. La construcción de la zona de bioretención es mejor realizarla en época seca y en caso de que coincida con la temporada de lluvias, deben ser dirigidas hacia otra parte, para evitar problemas de sedimentaciones y erosiones durante el proceso constructivo.

Excavación.

Hay que excavar el área bioretención a la profundidad fijada en proyecto y escarificar la superficie del suelo existente. Como ya se mencionó, es muy importante minimizar la compactación tanto de la base de la zona de bioretención como la del relleno posterior. Cuando sea viable, se usará maquinaria ligera para

retirar la tierra original. Todos los equipos se mantendrán fuera de la zona excavada en la máxima medida posible.

Las paredes y el fondo deben quedar, tras la excavación, libres de protuberancias o elementos que puedan dañar o impedir la correcta colocación de la membrana geotextil o *Geolámina* (*en caso de que no se deba permitir la infiltración*).

Cuando el medio no permita la infiltración, estos sistemas se pueden emplear como elementos de retención y laminación del volumen almacenado en su lecho poroso. En esos casos, lo primero que hay que hacer tras la excavación es cubrir toda la superficie de contacto del subsuelo con una lámina impermeabilizante con características como las mostradas en el *Modelo Conceptual* y comprobar que todas las juntas están bien selladas y que no se producen fugas.

Relleno.

Seguidamente a la excavación (o a la colocación de la geolámina) hay que rellenar el espacio vacío para evitar que se llene de sedimentos u otros materiales no deseados.

Geotextil.

El primer elemento del “relleno” es la membrana de geotextil, tanto por el fondo, como por los laterales.

Dren inferior.

Los sistemas de desagüe inferior deben colocarse con una pendiente mínima de 0,5% en la parte honda de la excavación. Se debe lograr una conexión estanca al agua por donde sale el dren del sistema a través de la membrana geotextil.

Lecho de grava.

El lecho de grava será la primera de las capas a colocar, dejando espacios libres que permitan la circulación del agua. Inmerso en este lecho irá el dren de desagüe.

Mezcla de suelo bioretención.

La mezcla de suelo de bioretención ha de ser colocada por capas de unos 30 cm máximo y de forma cuidadosa evitando compactaciones. En esta fase no se permite la entrada al sistema de equipamiento pesado. Cada vez que se coloque una capa de suelo, ha de ser saturada con agua hasta que drene por la parte inferior, esto facilitará el asentamiento del suelo. Si se contamina parte de la mezcla de suelo durante la construcción, esa fracción debe ser eliminada y reemplazada con material nuevo libre de contaminación. Si es necesario se realizará el allanamiento de la zona de forma manual. El relleno del suelo se ha de realizar siguiendo lo planificado en planos, dejando espacio para la capa de mantillo que irá sobre él.

Plantaciones.

Tras rellenar de suelo y comprobar que se ha realizado correctamente y tiene la altura necesaria, se procede seguidamente al plantado de las especies vegetales.

Durante la plantación hay que guardar especial cuidado en que no se depositen sedimentos u otros materiales sobre la superficie, de ser así, hay que retirarlos inmediatamente.

Las especies seleccionadas han de ser completamente viables. Su cultivo se ha de realizar en las temporadas en las que se dé su mejor arraigo, eso se puede consultar con el vivero que proporcione las especies. Se recomienda disponer de la opinión de un especialista que determine cuáles son las mejores plantas para cada caso y cómo y cuándo se han de plantar, para que el desarrollo y crecimiento se produzca de forma óptima. Hasta que la vegetación no esté completamente asentada no se podrá poner en funcionamiento el sistema de bioretención.

Es importante también regar frecuentemente durante la temporada seca del primer año para un establecimiento vegetal exitoso.

1. Mantenimiento.

Frecuencias de las tareas de mantenimiento.

Las áreas de bioretención requieren un mantenimiento marcado en muchos casos por la estacionalidad, puesto que uno de los elementos más importantes es la vegetación, que varía en función de la época del año.

Cuando son más importantes las tareas de mantenimiento es, sobre todo, el primer año. Al inicio del establecimiento de las plantas hay que cuidar su correcto arraigo para su posterior desarrollo. Por ello hay que regar de forma periódica y eliminar cualquier maleza no deseable en el sistema.

Transcurrida esa primera etapa no hará falta un mantenimiento muy exhaustivo, lo principal será regar en la época seca.

También es aconsejable realizar una evaluación del área tras un episodio de fuertes lluvias, controlando que los rebosaderos (o salidas de emergencia) no se hayan obstruido con hojas, hierba u otros materiales, y si es así, limpiarlos.

Y es recomendable, inspeccionar el sistema un par de veces al año, en la época de crecimiento vegetal.

Durante las inspecciones hay que evaluar la acumulación de sedimentos, la erosión y el estado de salud de la vegetación. Si la acumulación de sedimento llega al 25 % de la profundidad de encharcamiento, debe retirarse. Si se observa erosión dentro del área de bioretención, deben aplicarse medidas adicionales de estabilización del suelo adicional. Y si la vegetación parece estar mal de salud sin una causa obvia, se debe consultar a un especialista.

2.6.16 Franjas filtrantes.

1. Aspectos generales.

A continuación, se muestra un cuadro donde se resume la información respectiva de las franjas filtrantes:

Cuadro 42. Aspectos generales de las franjas filtrantes.

Resumen Franjas Filtrantes.	
<i>Descripción General.</i>	
Son áreas uniformes, anchas, con una pendiente suave y cubiertas con una densa grama. Su función más relevante es tratar la calidad de la escorrentía de las áreas adyacentes aguas arriba, reducen eficazmente los niveles de partículas contaminantes. También se consideran sistemas de conducción.	
<i>Funcionamiento.</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Permiten que el agua escurra a través de la vegetación a baja velocidad facilitando la filtración de las partículas suspendidas. - Los mecanismos de eliminación de contaminantes incluyen la sedimentación, la filtración, la absorción, la infiltración, la absorción en las raíces de las plantas, y la actividad microbiana. - A mayor anchura de franja y densidad de vegetación se obtiene mayor capacidad filtrante y grado de depuración de la escorrentía. - Para optimizar la sedimentación, se recomienda que la velocidad del flujo no supere los 0.3 m/s. 	
Control de la cantidad de agua.	No reducen la cantidad de aguas lluvias, a menos que se produzca infiltración, pero si reducen los picos de caudal de escorrentía al hacerla pasar por una superficie vegetada.
Control de la calidad del agua.	Son eficaces en la eliminación de los sólidos contaminantes a través de medidas como la filtración y la sedimentación. Los minerales se incorporan al suelo mientras que los nutrientes se eliminan por la absorción biológica.
Valor Paisajístico.	Las franjas filtrantes están a menudo integradas en el paisaje: en espacios públicos abiertos o en los laterales de viales. Se pueden utilizar semillas de gramas locales para aumentar su valor estético además de proporcionar un hábitat para la fauna.
<i>Propiedades.</i>	
Usos típicos:	Gestión de la escorrentía en zonas residenciales y comerciales. Esta técnica trata la escorrentía de extensiones de como mucho 2 hectáreas, si se quiere tratar una superficie mayor, es recomendable usar varias áreas de biorretención y dividir dicha superficie. Son superficies ajardinadas en depresión que además pueden tener otros usos como islas en estacionamientos, medianas de carretera o de funcionalidad estética en calles.
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> - Reducen la escorrentía, es recomendable en zonas muy impermeables, como las áreas de aparcamiento. - Elimina sedimentos finos, metales pesados, bacterias, nutrientes y materia orgánica. - Su diseño es flexible, hay varias opciones según diferentes condiciones que pueden darse. - Son estéticamente atractivas.
Limitaciones:	<ul style="list-style-type: none"> - No son apropiadas en zonas con pendientes superiores al 15%. - Las altas cargas de sedimentos pueden causar problemas, se recomienda algún tipo de pretratamiento. - Flujos concentrados pueden necesitar una consideración especial en el diseño.
Requisitos de mantenimiento:	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento de rutina de zonas ajardinadas, eliminación de malas hierbas y retirada de restos de poda y de plantas muertas. - Control de los sedimentos en la zona de césped.

Resumen Franjas Filtrantes.	
Rendimiento:	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del caudal punta: Medio - Reducción de volumen: Medio (alto con infiltración) - Tratamiento de calidad de agua: Bueno - Potencial beneficio social/urbana: Bueno - Potencial ecológico: Medio
<i>Construcción y/o instalación.</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Comprobar que la pendiente de la zona donde se va a implantar ha sido suficientemente estabilizada y se han tomado las correspondientes medidas para evitar erosiones y acumulaciones de sedimentos. - Debe instalarse en época seca, en los meses más favorables para el establecimiento exitoso de la vegetación, lo que puede requerir de un riego y mantenimiento hasta que las plantas hayan crecido o hasta la época de lluvias. - Se debe tener cuidado para perturbar lo menos posible la vegetación existente en la franja como en zonas adyacentes, aunque, en algunos casos, la nivelación de la ladera donde se va a instalar la franja puede requerir la eliminación de esta. - Utilizar la maquinaria más ligera posible para evitar alteración y compactación del terreno. - Preparar la entrada del flujo en el borde superior de la franja para que sea laminar. En las que se instale una zanja de gravas, se ha de tener especial cuidado en que esta no compacte el subsuelo para permitir la infiltración. - Revisar y refinar la nivelación de la superficie de la franja filtrante muy bien, esto es crucial incluso en franjas de pequeña envergadura puesto que cualquier irregularidad puede comprometer las condiciones para que se produzca el flujo laminar. - Durante la construcción hay que cuidar que la inclinación longitudinal de la franja sea uniforme y consistente, sin ondulaciones marcadas que provoquen el estancamiento localizado o el movimiento canalizado del flujo del agua. - Para que la plantación de semillas tenga éxito se debe afianzar franjas filtrantes con métodos de estabilización permanentes apropiados para el suelo, como el control de erosiones con el uso de geotextiles. - Una vez que la franja filtrante está suficientemente estabiliza pueden retirarse las medidas de control de erosión y sedimentación temporales que se hayan adaptado. - Si la construcción alcanza la época lluviosa, han de protegerse de los flujos de aguas lluvias hasta que la capa de vegetación esté completamente formada desviando el flujo y cubriendo la franja. - Si más del 30% del área de tratamiento queda desnuda después de cuatro semanas del final de la construcción, se requerirá la resiembra o replantación hasta conseguir que la cobertura alcance el 90%. 	

Fuente: Elaboración propia a partir de información de OPAMSS, Capítulo 18, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020.

Mantenimiento:

Para asegurar el buen funcionamiento de una franja filtrante es importante realizar inspecciones y un mantenimiento de manera regular y organizada. La planificación y fases del mantenimiento deben desarrollarse durante la fase de diseño y las necesidades de cuidado de la franja filtrante deben ser supervisadas

posteriormente para asegurar que se adaptan a los requisitos definidos en el proyecto.

Cuadro 43. Mantenimiento de las franjas filtrantes.

Frecuencias de las tareas de mantenimiento.	
<i>Tareas de mantenimiento regular.</i>	
Eliminación de basura y residuos.	Mensualmente o cuando sea necesario.
El corte de la grama para conservar la altura dentro del rango de diseño especificado.	Mensualmente en época de crecimiento y después cuando sea necesario.
Gestión de otros tipos de vegetación y eliminación de malas hierbas.	Al principio mensualmente y luego cuando sea necesario.
<i>Tareas de mantenimiento ocasional.</i>	
Comprobación del correcto crecimiento de la vegetación, labores de poda y retirada de hojas secas.	Anualmente.
Volver sembrar en las áreas donde la vegetación sea pobre. Si las plantas escogidas en un primer lugar no dieron buenos resultados, se cambiarán por otras mejor adaptadas a las condiciones de la franja.	Anualmente, o si el suelo desnudo es el 10% o más del área de la franja.
<i>Acciones correctivas.</i>	
Reparación de erosiones u otros daños mediante una resiembra.	Cuando sea necesario.
Volver a nivelar superficies irregulares y restablecer niveles de diseño.	Cuando sea necesario.
Escarificar y asentar la capa de mantillo para mejorar el rendimiento de la infiltración. Romper los depósitos de sedimentos que se hayan compactado en la superficie del suelo.	Cuando sea necesario.
Eliminar las incrustaciones de sedimento en la zanja de grava situada en el límite superior de la franja, así como de la línea de entrada de flujo.	Cuando sea necesario.
En caso de que lleguen restos de aceites o residuos de gasolina, se habrán de eliminar mediante las prácticas estándar de seguridad.	Cuando sea necesario.
<i>Monitorización.</i>	
Inspección de la superficie de la franja para identificar evidencias de erosión, compactación, encharcamiento, sedimentación y contaminación.	Semestralmente.
Comprobar que la línea de entrada de flujo está en buenas condiciones y que la superficie de la franja no ha sufrido variaciones en su pendiente.	Semestralmente.
Inspección de la zanja de gravas para establecer los tiempos de colmatación y de limpieza de obstrucciones.	Semestralmente.
Inspección de las tasas de acumulación de limos y sedimentos para establecer las frecuencias de eliminación adecuadas.	Semestralmente.

Fuente: OPAMSS, Capítulo 18, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 11.

Fig. 52. Franja filtrante como pretratamiento de un sistema de detención superficial.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 18, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 8.

2. Diseño.

Las franjas filtrantes están diseñadas para hacer pasar el agua de escorrentía superficial como una lámina continua, desde un extremo del plano hacia el extremo más bajo. Hay que evitar cualquier concentración de flujo, para ello la entrada desde la zona impermeable debe propiciar la distribución lineal homogénea. Siempre que se produzca un flujo concentrado, éste debe ser repartido uniformemente a lo ancho de la técnica mediante una loseta u otra estructura que asegure un flujo laminar.

Análisis de los condicionantes de diseño.

En general las franjas filtrantes se proyectan como pretratamientos a otros SUDS, son elementos complementarios dentro de la cadena de drenaje, por lo que su diseño se resuelve en un contexto más amplio.

Análisis de viabilidad.

Antes de proceder al diseño hay que comprobar que las franjas filtrantes son una solución viable. Para ello hay que analizar si las condiciones de la zona de proyecto son las adecuadas para el correcto desempeño de estos SUDS.

Pendiente del terreno.

Para que el agua circule por la superficie de las zanjas, ésta ha de tener una cierta inclinación, para lo que se emplea la pendiente natural del terreno. Aunque pueden instalarse hasta pendientes del 10%, para el *AMSS* deberá estar entre el 2% y el 6%, dados los riesgos de deslizamientos de laderas. Además, si se usan estas franjas en suelos inestables con pendientes importantes, se pueden producir pequeñas zanjas o cárcavas que destruirían el flujo superficial uniforme e impedirían el buen funcionamiento de la técnica. Tampoco se recomienda su instalación cerca de taludes para evitar desprendimientos.

Suelo.

Las franjas filtrantes pueden ser utilizadas en la mayoría de los lugares, pero hay que tener en cuenta que si cerca de la superficie hay Tierra Blanca Joven puede que se infiltre agua causando problemas dentro del sistema, por lo que habrá que evitar su instalación en esos casos o colocar una geolámina impermeable debajo del sustrato donde crece la grama que impida la percolación del agua. Lo idóneo es que la capa superior del suelo sobre el que se construye la franja filtrante permita el crecimiento de la vegetación densa, preferentemente de grama.

Área drenante.

Las franjas filtrantes han de emplazarse justo al lado del área a drenar y de forma paralela, de manera que reciba el agua como una lámina desde la superficie drenante. Deben integrarse con el paisaje y diseño general del espacio donde se ubican. Se recomienda que debe haber por lo menos 1 m de longitud de franja filtrante por cada 6 m de la zona de aporte y que la longitud máxima del área impermeable a drenar sea de unos 50 m. Dado el espacio que necesitan, las franjas filtrantes no son buenas opciones en las zonas altamente urbanizadas ni donde la disponibilidad de terreno esté limitada.

Dimensionamiento.

El punto de partida del dimensionamiento comienza con la estimación del caudal de diseño para un periodo de retorno de 10 años generado en el área impermeable aportante. Conocido éste se emplea Manning para estimar el ancho y largo de la franja. Pero teniendo en cuenta unos factores limitantes: la lámina de agua no ha de superar los 25 mm de altura para el caudal de diseño de 10 años de periodo de retorno y la carga hidráulica no ha de ser superior a 4,5 l/s por metro lineal. La altura de agua no ha de ser superior a la mitad de la altura del césped (se ha de mantener a 50 mm de altura máxima).

Ancho de la franja (línea perpendicular al flujo de agua). Se puede estimar como:

$$A_F = \frac{Q}{4.5}$$

Ec. 32. *Estimación de la anchura mínima de la franja filtrante.*

Donde,

Q(l/s): caudal total aportante a la franja desde superficies impermeables que evacuan hacia ella.

La altura de agua H_F (m) de una lámina de caudal Q (m³/s) repartida en todo el ancho A_F (m) de la franja, con una pendiente longitudinal I (m/m) se puede estimar con la relación:

$$H_F = \left[\frac{0.05Q}{A_F \sqrt{I}} \right]^{3/5}$$

Ec. 33. *Estimación de la altura que alcanza la lámina de agua en la franja.*

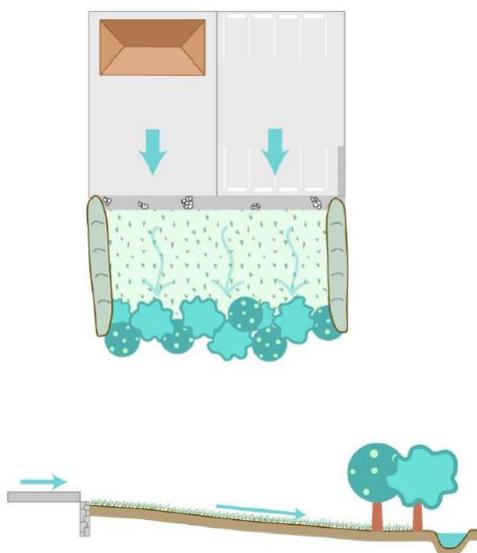
El largo de la franja (en el sentido del flujo) (L_F) debe ser superior al mayor de los valores siguientes para que resulte efectiva:

$$L_F > 2.5 \text{ m}$$

$$L_F > 0.2L_{APORTANTE}$$

Con $L_{APORTANTE}$ = longitud del recorrido del agua sobre la superficie aportante de escorrentía antes de ingresar a la franja.

Fig. 53. Esquema en planta y perfil de una franja filtrante.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 18, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 7.

Otros aspectos de diseño.

El diseño de detalle incluye el diseño y dimensionamiento de los elementos auxiliares como son el acoplamiento con las superficies contiguas, la existencia de elementos de separación como superficies de suelo discontinuas, y la conexión con el drenaje general. Para asegurar que el flujo es constante y evitar problemas de erosiones, la parte superior y la inferior de la franja deben ser lo más lisas posible. A modo de pretratamiento se puede colocar una franja de gravas con una pendiente lateral suave en la parte superior de la franja filtrante.

Debe contemplarse cuál será la vegetación que se va a establecer, sus necesidades de plantación, de riego y de mantenimiento. Se necesita grama densa para favorecer la sedimentación, la filtración y la protección contra la erosión. La altura recomendable es de 3 a 5 cm y deben ser regados en la época

seca si es necesario. Como anotación hay que indicar que cuando se mezclan diferentes tipos de plantas además del césped, la estabilidad del terreno aumenta.

También es conveniente que las franjas filtrantes estén protegidas del tránsito de personas o vehículos ya que pueden dañar la vegetación o afectar al flujo laminar superficial.

Las franjas filtrantes no son efectivas para fuertes aguaceros, por lo que deben permitir que los caudales que exceden de los de diseño pasen por ellas hacia aguas abajo con seguridad, no ha de suponer un bloqueo.

En caso de que no se pueda producir la infiltración por estar localizadas sobre estratos de Tierra Blanca Joven.

2.6.17 Depósitos subterráneos de detención.

1. Aspectos generales.

A continuación, se muestra un cuadro donde se resume la información respectiva de los depósitos subterráneos de detención:

Cuadro 44. Aspectos generales de los depósitos subterráneos de detención.

Resumen Depósitos subterráneos de detención.	
<i>Descripción General.</i>	
Son instalaciones subterráneas de almacenamiento de aguas que sirven como una alternativa a la detención en superficie para el control de la escorrentía, especialmente en áreas con restricciones espaciales donde no hay terreno disponible. Están diseñados para controlar los caudales pico, limitar inundaciones aguas abajo, y proporcionar cierta protección al medio donde se vierte la escorrentía, proporcionan una escasa eliminación de contaminantes, se puede producir sedimentación de partículas que son susceptibles a la resuspensión en posteriores tormentas.	
<i>Funcionamiento.</i>	
La escorrentía va a parar a ellos donde se van acumulando hasta un determinado momento en el que sale un caudal más bajo que el caudal de entrada, laminando así el flujo.	
Control de la cantidad de agua.	Estos elementos no reducen el volumen de escorrentía, pero son muy eficaces en la laminación de la escorrentía de eventos pluviométricos.
Control de la calidad del agua.	No ayudan en el control de la escorrentía, aunque sí que precipitan algunas partículas por la detención y pérdida de velocidad del flujo.
Valor paisajístico y medioambiental.	Son elementos enterrados, no tienen valor ni ambiental ni paisajístico.

Resumen Depósitos subterráneos de detención.	
<i>Tipos</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de almacenamiento modulares formados por celdas de plástico de alta resistencia envueltas en geomembranas impermeables. - Tubos de gran diámetro (de plástico, acero o concreto). - Elementos prefabricados (plásticos o de concreto). - Depósitos construidos in situ de concreto. - Estructuras híbridas entre los elementos anteriores. - La flexibilidad de formas y tamaños que ofrecen estos dispositivos, hacen que la detención subterránea sea fácilmente adaptable a cada sitio específico. 	
<i>Propiedades.</i>	
Usos típicos:	<ul style="list-style-type: none"> - Atenuación de los caudales pico en zonas densamente pobladas. - Control de cantidad de pluviales en sitios con disponibilidad de espacio restringida. - Estacionamientos y otras áreas desarrolladas siempre que se pueda acceder al sistema para tareas de mantenimiento. - Como parte de un tren de tratamiento de aguas pluviales, en combinación con otras prácticas de tratamiento que proporcionan reducción de contaminantes y/o recarga de aguas subterráneas.
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcionan un alto volumen de almacenamiento y no ocupan espacio en superficie, lo que es útil en suelos densificados, como es el caso del AMSS. - Pueden emplearse bajo parqueos, aceras y plazas en condominios siempre que estén diseñados para soportar cargas de tráfico. Los diferentes tipos de detención presentan distintas resistencias a la carga estructural, en todos los casos se evitará su instalación en calzadas y carreteras y se requerirá de un diseño estructural del dispositivo seleccionado.
Limitaciones:	<ul style="list-style-type: none"> - No es útil para tratamientos de la calidad del agua (generalmente brindan menos de 24 horas de detención). - Susceptibles a la resuspensión del material resuelto por tormentas sucesivas. - No reducen el volumen de escorrentía ni facilitan la recarga de acuíferos. - Pueden verse afectados si se instalan enterrados en tierra blanca joven (TBJ) ya que, si a esta llega agua, cambia la estructura del subsuelo y puede afectar a la disposición del sistema. Por ello se deben tomar medidas preventivas durante la construcción para evitar que esto ocurra. - En algunos casos se deberá utilizar sistema de bombeo para su desfogue y rebalse.
Requisitos de mantenimiento:	Deben revisarse y limpiarse antes de la temporada de lluvias para comprobar que no hay pérdida de volumen de almacenamiento útil por deposición de sedimentos.
Rendimiento:	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del caudal punta: Bueno - Reducción de volumen: Nulo - Tratamiento de calidad de agua: Bajo - Potencial beneficio social/urbana: Medio-Alto - Potencial ecológico: Bajo

Resumen Depósitos subterráneos de detención.	
<i>Construcción y/o instalación.</i>	
Todas las estructuras de los tanques deberán construirse de acuerdo con la normativa de El Salvador en materia de infraestructuras y probadas antes de su puesta en marcha para asegurar su hermetismo.	
Comprobaciones Previas:	<ul style="list-style-type: none"> - Se deben realizar verificaciones de control de calidad en la entrega de productos y materiales. - Comprobarse el buen estado de los elementos que se van a emplear en su manejo o almacenamiento en obra y que el uso se hace según indicaciones del fabricante.
Excavación:	<ul style="list-style-type: none"> - Las excavaciones deben mantenerse libres tanto de agua subterránea como de escorrentía superficial. - El control del agua subterránea es de gran importancia para la seguridad y la estabilidad de la unidad del tanque y de la excavación. - La base de la excavación en la que se coloca el tanque debe estar limpia, firme y nivelada, para evitar problemas estructurales. - Se recomienda poner en la base un lecho de arena o gravilla.
Colocación y ensamblaje de estructuras / tuberías / otros elementos:	Todos los tipos de tanques deben colocarse y ensamblarse de acuerdo con las normas, especificaciones y orientación pertinentes.
El relleno:	<ul style="list-style-type: none"> - Debe cumplir con todas las suposiciones hechas por el calculista de estructuras ya que son críticos para el rendimiento estructural. - En caso de ejecutar tanques de concreto, las excavaciones se pueden rellenar con material excavado que no contenga partículas grandes ni materiales filosos bien compactado. - El relleno y tipo de compactación vendrá definida por la normativa en materia de carreteras o de infraestructuras aplicable al AMSS. - Siempre habrá que tener en cuenta que el uso de un relleno de baja calidad que puede aumentar significativamente las presiones laterales del subsuelo sobre los tanques.
Envolvente:	Todos los tanques de almacenamiento deben ser herméticos, tanto si son de hormigón como de celdas plásticas envueltas en membranas. Durante la construcción es conveniente comprobar que no existan fugas, verificándolo "in situ".

Fuente: Elaboración propia a partir de información de OPAMSS, Capítulo 19, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020.

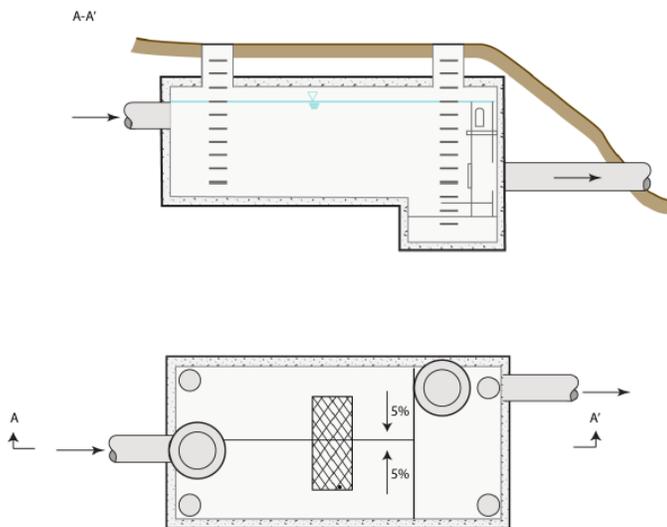
Mantenimiento: Se deberá facilitar un acceso para el mantenimiento adecuado para todos los sistemas de detención subterránea (incluidos pozos previos de desbaste y posteriores de control). Las aberturas de acceso pueden consistir en una rejilla y una cubierta sólida, o un panel extraíble, dependerá de la tipología del depósito.

Cuadro 45. Mantenimiento de los depósitos subterráneos de detención.

Frecuencias de las tareas de mantenimiento.	
<i>Tareas de mantenimiento regular.</i>	
Inspeccionar e identificar cualquier elemento que no esté funcionando correctamente.	Inspección mensual el primer trimestre y luego anualmente y después de una tormenta importante.
Eliminar sedimentos de la cuenca aportante.	Semanalmente, con frecuencia diaria en días previos a previsiones de tormentas.
Retirar sedimentos de pozos de entrada y salida, así como revisión de rebozaderos.	Anualmente o cuando se requiera.
<i>Acciones correctivas.</i>	
Reparar / rehabilitar entradas, salidas, rebozaderos y conductos de ventilación.	Cuando se requiera.
<i>Monitorización.</i>	
Comprobar que todas las entradas, salidas, salidas de aire y desbordamientos para asegurarse de que estén en buenas condiciones y que funcionan según lo previsto.	Anualmente.
Inspeccionar el interior del tanque para si hay acumulación de sedimentos y eliminación.	Anualmente o cuando se requiera.

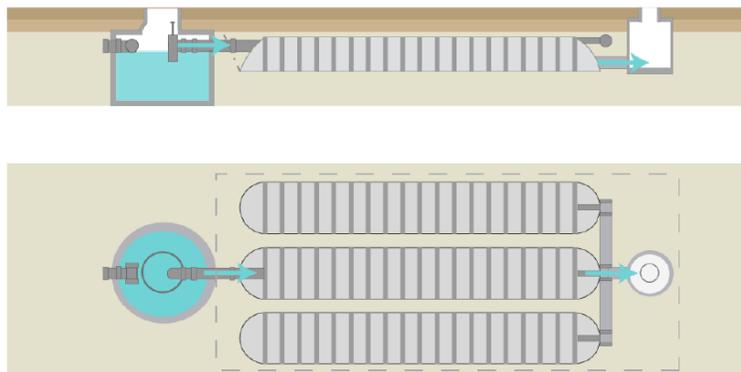
Fuente: OPAMSS, Capítulo 19, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 10.

Fig. 54. Esquema en planta y sección de un depósito de detención subterráneo.



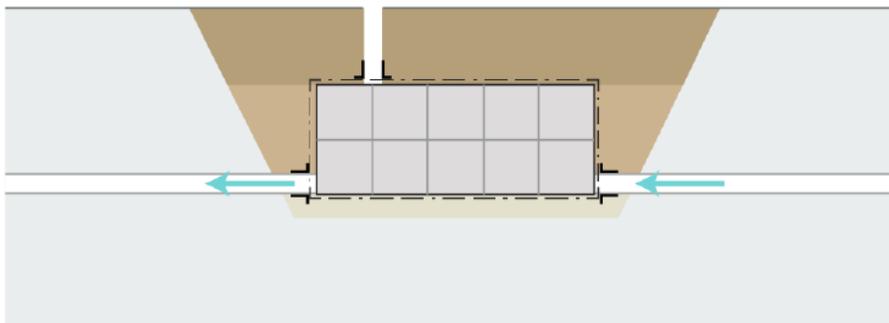
Fuente: OPAMSS, Capítulo 19, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 2.

Fig. 55. Esquema en planta y sección de un depósito de detención subterráneo formado por tres sistemas plásticos de almacenamiento puestos en serie. El flujo pasa por una decantación previa y sale a un pozo de control.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 19, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 3.

Fig. 56. Ejemplo depósito subterráneo compuesto por celdas plásticas con la sección de excavación y relleno ajustados para repartir las cargas.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 19, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 3.

2. Diseño.

Análisis de los condicionantes de diseño.

Ubicación.

Los sistemas de detención subterránea se instalan para tratar la escorrentía de pequeños desarrollos urbanos. Deberán ser emplazados en lugares fácilmente accesibles para las labores de mantenimiento. Además, se evitarán áreas o

estructuras en las que no puedan excavarse en caso de que sea necesario un reemplazo.

Los depósitos subterráneos se pueden diseñar como sistemas en línea o en paralelo a la red de drenaje secundaria. La selección de una u otra localización dependerá de la disponibilidad espacial para instalar el depósito y de las necesidades específicas de drenaje de cada zona.

Condicionantes estructurales.

Cada uno de los diferentes tipos de depósitos de detención subterránea que se han mencionado, tiene una metodología específica de diseño estructural según su forma y los materiales con los que se ha fabricado, que, para el caso de AMSS ha de seguir las recomendaciones de los estándares de calidad de la American Society of Testing and Materials (ASTM) y, por supuesto que cumpla con el *Reglamento para la seguridad Estructural de El Salvador*.

En cualquier caso, el proyectista ha de considerar los factores que se enumeran a continuación, que en muchos casos dependerá del sistema a emplear, por lo que es fundamental la comunicación entre el diseñador y el fabricante del sistema (en caso de ser prefabricado):

- Influencia de las condiciones específicas del suelo en el desempeño estructural e hidráulico del depósito.
- La influencia del tanque en el suelo circundante.
- Posibles procesos de deformación para el diseño de tanques o celdas modulares plásticos.
- Aplicabilidad y relevancia de los resultados de las pruebas de resistencia del laboratorio de los fabricantes.
- Limitaciones de diseño de los fabricantes en el rendimiento del sistema como las restricciones en profundidad.
- Rendimiento estructural previsto y escenarios que pueda llevar a una sobrecarga.
- La afectación al sistema por variaciones en los niveles piezométricos.

- La influencia de la infiltración de agua en el suelo circundante por si puede producir fallas estructurales en el sistema.

Se deben verificar que el depósito se mantendrá estable durante su vida útil por lo que, se debe verificar que:

- La estructura es estable bajo cargas normales de trabajo para las obras permanentes.
- Bajo cargas accidentales se debe confirmar la capacidad de las unidades para soportar cargas extremas ocasionales, por ejemplo, vehículos pesados.
- Se mantiene la estabilidad de la estructura durante las obras de instalación.

Dimensionamiento.

La estimación del volumen necesario laminar se realizará para una tormenta de diseño de 10 años de periodo de retorno y una hora de duración, a menos que OPAMSS determine que hay que emplearse otro valor por motivos de seguridad. Por motivos de seguridad es recomendable que el depósito tenga un resguardo del 20% y una salida de emergencia.

La entrada al depósito se produce desde una tubería dimensionada para poder transportar todo el caudal de entrada, que procederá de un pozo previo de decantación que se instala para que los sólidos suspendidos precipiten antes de su entrada al sistema.

La laminación de los caudales pico, se producen mediante el control de la salida de flujo del sistema.

Ésta se ha de calcular como un orificio en caso de estar sumergida o un vertedero en el caso de que no. Además, si se trata de un sistema de control regional, también deberá de disponer de un dispositivo de salida de emergencia diseñado para una tormenta de 50 años de periodo de retorno y una hora de precipitación.

Esta salida se calculará como vertedero y puede ser un tubo, un vertedero lateral o un dispositivo especial prefabricado (en cuyo caso habrá que preguntar al fabricante por su capacidad y características). Este elemento es necesario para

evitar que el sistema pierda su capacidad de funcionamiento y para dar una salida segura al caudal excedente.

Los puntos de salida de los depósitos de almacenamiento subterráneo serán dos claramente diferenciados. Uno, la tubería de desfogue situado a nivel de la solera de la estructura cuyo diámetro vendrá determinado por la necesidad de desaguar el tanque en un máximo de 24 horas. Y la salida de emergencia, situada en la parte superior del sistema, de manera que sólo comienza a evacuar el agua que alcanza una determinada altura dentro del sistema.

Puesto que en muchos casos se trata de elementos prefabricados, las entradas, salidas, y otros elementos adicionales tienen también unas dimensiones predeterminadas. Habrá que comprobar que se adecúan para proyecto específico.

En la mayoría de los casos es conveniente que, del depósito, el agua se dirija a un pozo de control y, de ahí, saldrá el colector hacia la red de drenaje.

El dimensionamiento del volumen necesario para el depósito puede realizarse de igual manera que los estanques de laminación, partiendo de un balance de masas entre el hidrograma de entrada (determinado por la pluviometría y el tamaño de cuenca) y el de salida (que dependerá de la altura de la lámina de agua alcanzada en el depósito y de las características físicas del elemento de salida).

Puesto que son elementos que aportan gran caudal a la red de microdrenaje, y dada la situación de ésta en el AMSS, cuando se haya hecho el dimensionamiento, será conveniente crear un modelo en el que se simule el funcionamiento conjunto del depósito y con el tramo (ya sea macro o micro drenaje) donde descarga, para asegurar un funcionamiento hidráulico correcto dentro del contexto en el que se enmarca.

2.6.18 Estanques de laminación.

1. Aspectos generales.

A continuación, se muestra un cuadro donde se resume la información respectiva de los estanques de laminación:

Cuadro 46. Aspectos generales de los estanques de laminación.

Resumen Estanques de Laminación.	
<i>Descripción General.</i>	
Son depósitos de almacenamiento a cielo abierto que se diseñan para vaciarse totalmente después de un periodo relativamente corto tras una tormenta, por lo que gran parte del tiempo se encuentran vacíos o secos. Pueden ser infraestructuras grises de concreto o losas o infraestructuras verdes, realizadas en suelo natural con vegetación. reducir los caudales máximos hacia aguas abajo, pero en época seca el espacio que ocupan puede ser empleado para otras funciones. (Deportivas, por ejemplo).	
<i>Funcionamiento.</i>	
Las aguas lluvias se canalizan normalmente a un estanque a través de un sistema de tubos, de una red de canales o de otras técnicas sostenibles como cunetas verdes. Allí son almacenados durante algún tiempo y el caudal sale laminado por un punto de control. Las lagunas en el AMSS no han de retener el caudal de tormenta por más de 24 horas, es preferible que desagüen en 12 horas máximo dadas las frecuencias en época lluviosa.	
Control de la cantidad de agua.	Proporcionan una excelente función como reductores del caudal punta.
Control de la calidad del agua.	Con las lagunas se puede obtener una mejora de la calidad del agua, especialmente a través del proceso de sedimentación de contaminantes sólidos, pero dependerá del tiempo que el agua permanezca estancada.
Valor paisajístico y medioambiental.	Si están ajardinados con una gran variedad de herbáceas, arbustos y plantas típicas de humedales, aumenta la estabilidad de sus orillas y los hace más estéticos, pudiendo funcionar como espacios recreativos.
<i>Componentes básicos</i>	
- Entrada. - Disipador energía.	- Sedimentador. - Zona de almacenamiento. - Vertedero de seguridad. - Colector de salida.
<i>Propiedades.</i>	
Usos típicos:	Gestión de la escorrentía en zonas residenciales de no muy alta densidad donde además de dar valor paisajístico puede tener otros usos sociales.
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> - Tiene capacidad de gestión para tormentas con período de retorno alto. - Elimina parte de los contaminantes urbanos. - Con el fondo impermeabilizado, puede utilizarse donde las aguas subterráneas sean vulnerables. - Suele tener buena aceptabilidad en las comunidades. - Alto potencial ecológico, estético y puede tener usos recreativos. - Pueden agregar valor a las propiedades locales.

Resumen Estanques de Laminación.	
Limitaciones:	<ul style="list-style-type: none"> - No se produce ninguna reducción significativa en el volumen de escorrentía. - Sin una entrada de agua regular, se pueden dar condiciones de anaerobiosis. - En zonas densamente pobladas existe limitación de espacio. - No es recomendable su construcción en zonas escarpadas. - Colonizaciones por especies invasoras podrían aumentar las necesidades de mantenimiento.
Requisitos de mantenimiento:	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe proporcionar una vía de acceso de mantenimiento que sea suficientemente robusta para soportar equipos de mantenimiento y vehículos. - Labores típicas de mantenimiento serían: <ul style="list-style-type: none"> - Eliminación de restos y residuos. - Mantener en buen estado la vegetación (de existir), tanto la de los laterales como la sumergida. - Limpiar las entradas y salidas de agua. - Controlar el nivel de sedimentos y eliminar cuando sea preciso. - Promover la aireación cuando aparezcan signos de eutrofización.
Rendimiento:	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del caudal punta: Bueno - Reducción de volumen: Escaso - Tratamiento de calidad de agua: Bueno - Potencial beneficio social/urbana: Bueno - Potencial ecológico: Medio (o bueno, según diseño)
<i>Construcción y/o instalación.</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Previamente a comenzar las obras se han de analizar todos los aspectos que pueden producir algún problema durante la construcción como son: <ul style="list-style-type: none"> o Aparición de problemas estructurales por el tipo de suelo. o La presencia de escombros enterrados en la zona donde se va a implantar el sistema. o Los límites por las colindancias vecinales. o Los ensayos geotécnicos realizados para estudiar la adecuación del terreno en la fase de proyecto. - Se deben realizar estudios del suelo durante la construcción de las obras para comprobar la estabilidad de los taludes o muros empleados como delimitadores del estanque. - La excavación y los movimientos de tierras han de quedar programados, se debe establecer el destino del suelo excavado, si va a emplearse en el proceso constructivo con posterioridad o si no, su destino final. - Antes de la excavación se deben eliminar elementos que impidan o dificulten la excavación, como árboles o estructuras inservibles que deberán ser demolidas. - Se debe disponer con un sistema de drenaje provisional que desvíe el agua hasta que la obra esté acabada, para evitar que el agua entre en la depresión excavada. - Indicar si hay alguna zona por la que no deban pasar las máquinas y marcarla sobre el terreno. - Es muy importante establecer un sistema de control de las cotas o niveles que asegure que las cotas de los elementos que componen el sistema siguen las indicaciones de proyecto para que la línea de agua circule según cálculos. 	

Fuente: Elaboración propia a partir de información de OPAMSS, Capítulo 20, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020.

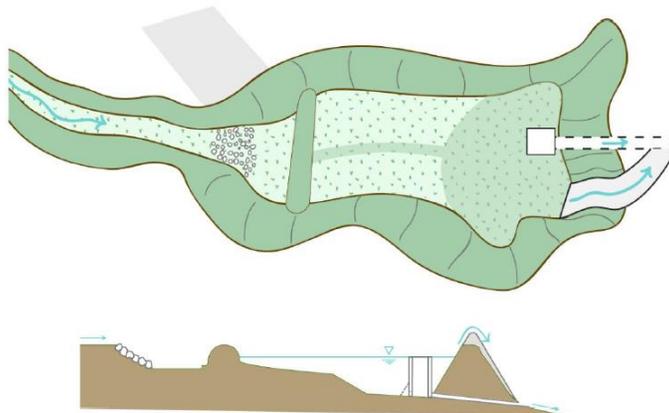
Mantenimiento: Las lagunas de laminación no requieren de un mantenimiento muy frecuente y exhaustivo, pero dependerá en gran parte de los usos secundarios que se le dé en periodo seco. Si se trata de un espacio abierto al público es importante mantenerlo en buenas condiciones de limpieza y que las obras de entrada y salida no sean accesibles para evitar problemas que puedan hacer que el agua permanezca estancada más tiempo del de diseño. Estancamientos prolongados de la escorrentía favorecen el desarrollo de mosquitos que hacen necesario el empleo de pesticidas.

Cuadro 47. Mantenimiento de los estanques de laminación.

Frecuencias de las tareas de mantenimiento.	
<i>Tareas de mantenimiento regular.</i>	
Limpiar de basuras la superficie e inmediaciones del estanque.	Mensualmente o cuando se requiera.
Retirar la vegetación seca y revegetar zonas que lo necesiten.	Mensualmente el primer año, después cuando se requiera.
Limpiar entradas, salidas y aliviadero.	Anualmente antes del comienzo de la época de lluvia, al final de la misma o cuando se requiera.
Inspeccionar el estado de finos y sedimentos en los puntos de entrada, salida y cámara de sedimentación para definir un plan de mantenimiento y limpieza anual.	Mensualmente en la época de lluvias (el primer año).
<i>Tareas de mantenimiento ocasional.</i>	
Poda de arbustos (si los hubiera) y retirada de restos.	Cada dos años o cuando se requiera.
Cortar la grama.	Estacionalmente o cuando se requiera.
<i>Acciones correctivas.</i>	
Reparar posibles socavones o pérdidas de suelo por erosiones.	Cuando sea requerido.
Recolocación del lecho de grava/roca empleado como dissipador de energía.	Cuando sea requerido.
Rehabilitación de los elementos que componen las entradas, salidas y vertederos.	Cuando sea requerido.
Reajustar los niveles de la superficie a los de diseño.	Cuando sea requerido.
<i>Monitorización.</i>	
Inspeccionar el funcionamiento de las entradas y salidas para detectar obstrucciones, erosiones y sedimentación.	Inspeccionar el funcionamiento de las entradas y salidas para detectar obstrucciones, erosiones y sedimentación.
Cada inicio de temporada de lluvias.	Cada inicio de temporada de lluvias.

Fuente: OPAMSS, Capítulo 20, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 14.

Fig. 57. Ejemplo de planta y perfil de un estanque de laminación. El agua entra por la izquierda, pasa una zona donde pierde velocidad y entra a la laguna propiamente dicha. La salida se produce por la cámara de descarga (recuadro en el esquema) y por el rebosadero de emergencia cuando alcanza una determinada altura.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 20, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 3.

2. Diseño.

Análisis de los condicionantes de diseño.

Área drenante.

Normalmente, el espacio requerido para este tipo de lagunas es aproximadamente entre un 0,5% a un 2% del total del área aportante.

Suelo.

Pueden instalarse en cualquier tipo de suelos, por ello debe considerarse en el diseño, puesto que si es permeable deberá acondicionarse con una geolámina u otro sistema impermeabilizante para evitar la infiltración.

Hidrología.

En la selección del periodo de retorno para la estimación de caudales, al tratarse de una obra de control local/regional que acumula las aguas lluvias de una zona extensa, además del *Reglamento OPAMSS* habrá que tener en cuenta lo dispuesto por la entidad competente ambiental, el *MARN*. Ya que, de tratarse de

una infraestructura hidráulica para el control del impacto hidrológico en la “*Guía de Estudios Hidrológicos e Hidráulicos*” viene definido que el periodo de retorno a emplear para el dimensionamiento es de 25 años.

Fig. 58. Infraestructura gris de acumulación y laminación con salida al siguiente depósito superficial.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 20, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 6.

Dimensionamiento.

En el diseño en planta del estanque se debe considerar una expansión gradual desde la zona de entrada de la escorrentía hacia el centro y de ahí una contracción hacia la salida, con el fin de impedir atoramientos o acumulaciones de agua en zonas no deseadas. El largo del estanque ha de ser más del doble del ancho y si es posible cuatro veces o más

También se recomienda un diseño con dos alturas o niveles, así la escorrentía de las lluvias más frecuentes se moverá por la zona más profunda no extendiendo la carga de sedimentos por toda la extensión del estanque, lo que facilitará posteriormente las tareas de mantenimiento.

Si el estanque va a recibir finos y sedimentos, se aconseja incrementar un 20% el volumen de almacenamiento para no perder capacidad hidráulica.

Anteriormente en el *Modelo Conceptual* se muestra cómo hacer una estimación de un elemento de retención o almacenamiento. a continuación, se profundiza un poco más en el cálculo de volúmenes y caudales para el estanque de laminación.

Existen varios procedimientos para estimar el volumen de almacenamiento necesario. Un método sencillo es a partir del hidrograma de entrada y el de salida.

Existen varios procedimientos para estimar el volumen necesario, el más típico es considerar la ecuación de continuidad en su forma diferencial a partir de los hidrogramas de entrada y de salida:

$$\frac{dV}{dt} = Q_E - Q_S$$

Ec. 34. Variación del volumen acumulado en función de los caudales de entrada y salida.

- $\frac{dV}{dt}$: Volumen en el estanque en un momento determinado.
- Q_E : Caudal de entrada en un momento determinado.
- Q_S : Caudal de salida en un momento determinado.

Uno de los métodos más empleados para la integración de esta ecuación es el de la curva de acumulación del "Soil Conservation Service" del Departamento de Agricultura de USA, que parte de que los caudales de entrada y salida se pueden representar para un intervalo de tiempo Δt como la media de caudal al principio y al final del intervalo, con lo que el caudal de entrada es:

$$Q_E = \frac{(Q_{E_t} + Q_{E_{t+\Delta t}})}{2}$$

Ec. 35. Caudal de entrada.

El de salida:

Ec. 36. Caudal de salida.

$$Q_s = \frac{(Q_{S_t} + Q_{S_t+\Delta t})}{2}$$

Y el volumen en ese intervalo de tiempo:

$$V_{t+\Delta t} - V_t = \frac{(Q_{E_t} + Q_{E_t+\Delta t}) \cdot \Delta t}{2} - \frac{(Q_{S_t} + Q_{S_t+\Delta t}) \cdot \Delta t}{2}$$

Ec. 37. *Estimación del volumen acumulado en un margen de tiempo determinado.*

Esta es una metodología simplificada que se recomienda acompañe con un modelo hidráulico del funcionamiento del estanque, para lo cual pueden emplearse un software de simulación hidráulica.

Diseño de los elementos adicionales.

Entrada de flujo.

Fig. 59. Una de las múltiples entradas laterales de estanque de laminación de tipo infraestructura gris.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 20, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 8.

La entrada al estanque puede producirse por un tubo emboquillado o un canal con protección contra la erosión como un lecho de rocas que actúa como disipador de energía. Además, pueden existir uno o varios puntos de entrada de caudal

Taludes del estanque.

Deben facilitar la entrada y salida de los operarios y maquinaria que realicen los trabajos de mantenimiento y además no suponer un riesgo para las personas por caídas, por lo que se recomienda que tengan pendientes suaves tipo 4H:1V (a menos de que se trate de una infraestructura gris, que en ese caso podrán ser verticales). En los taludes aguas abajo, por donde se encuentra el dispositivo de caudal, la corona del talud se aconseja que la corona del talud deje un resguardo de 0,3 m sobre la cota máxima de la lámina de agua para el volumen de diseño.

Vegetación.

Aquellas lagunas que son infraestructuras grises (elementos completamente artificiales recubiertos de losas, concreto...) no necesitan de un recubrimiento protector. Pero en aquellas realizadas en el suelo natural se debe cubrir la superficie de vegetación del estanque ayuda a controlar la erosión y retiene las partículas que arrastra la escorrentía. Una opción es plantar grama o plantas cuyas raíces no dañen a la capa de geolamina impermeabilizante (si la llevara) ni faciliten la infiltración del agua.

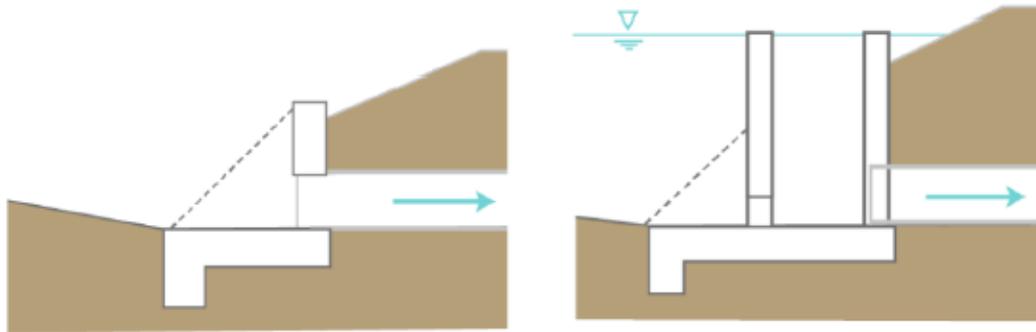
En el diseño de estos elementos hay que tener en cuenta que necesitarán de revisiones y reemplazo de vegetación, por lo que el proyectista ha de contemplar los posibles pasos para que los operarios puedan realizar su trabajo correctamente y de forma segura.

Salida.

Cámara o caja de descarga.

Es el elemento por que sale el caudal desde el estanque. Existen diferentes tipos, una muy común es una cámara vertical conectada al colector de salida que atraviesa el talud hacia el punto de vertido y que está abierta en la parte superior

Fig. 60. Ejemplo de sección de dos cámaras de descarga. A la izquierda una salida simple, el agua pasa por la reja inclinada y entra al tubo de salida. A la derecha el agua pasa por un orificio que establece el caudal de salida y, si se alcanza una determinada altura, sale por la parte superior de la cámara que está protegida por una reja, los colectores de salida en este caso ha de tener capacidad para evacuar el caudal que entra por el orificio y el que lo hace por la parte superior de la cámara.



Fuente: OPAMSS, Capítulo 20, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 10.

donde se dispone una reja y por donde entra el agua cuando alcanza esa altura (que es la máxima de almacenamiento). También pueden emplearse una más simple consistente en un muro con un orificio de salida y una reja en disposición oblicua. No se recomienda el uso válvulas o compuertas que demanden la presencia de personal durante las tormentas. La estimación del caudal que entra en la cámara vertical puede realizarse considerando que el agua pasa por un orificio y el que lo hace por la reja superior una vez alcanza el agua cierta altura, considerando su funcionamiento tipo vertedero.

Colector de salida.

Desde la cámara sale el colector por el que sale el caudal laminado. El caudal máximo que debe salir por él será el determinado según el tipo de punto de vertido y lo establecido en el Permiso de Factibilidad, por lo que se puede dimensionar como:

$$A_c = \frac{Q_{max}}{\sqrt{\frac{2gh}{k}}}$$

Ec. 38. Área del colector de salida.

- A_c : Área de la sección del colector de salida.
- Q_{max} : Caudal máximo que ha de salir por el conducto.
- h : Distancia desde la superficie de la lámina de agua hasta el centro del orificio.
- k : coeficiente de pérdida de carga total en el conducto, $k = k_e + k_s + f/D_c$ con k_e como las pérdidas a la entrada, k_s como las pérdidas a la salida, f , coeficiente de fricción y D_c diámetro del colector. Se pueden emplear los valores típicos de $k_e=0.2$, $k_s=1$ y como coeficientes de fricción:

Cuadro 48. Valores típicos de coeficientes de fricción.

Material	Factor de fricción
PV	0.012
Acero	0.015
Cemento	0.018

Fuente: OPAMSS, Capítulo 20, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 10.

Vertedero o rebosadero de seguridad.

Este elemento sirve para desaguar de forma segura el excedente de caudal que se va acumulando en el estanque. Se puede dimensionar como un vertedero de pared gruesa o fina, según sea la morfología del elemento (ecuación en Fase 3). El caudal de diseño a emplear es la diferencia entre el caudal generado por un periodo de retorno mayor al de diseño de volumen (cumpliendo con lo establecido en el *Reglamento a la ley De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial del Área*

Metropolitana de San Salvador y de los municipios aledaños con sus anexos, será de $T_r=50$ años) y el caudal que se evacúa por el colector de salida.

2.6.19 Medidas no estructurales.

A continuación, se presenta un cuadro que sintetiza lo referente a medidas no estructurales que se pueden adoptar junto con las técnicas *SUDS*.

Cuadro 49. Resumen de medidas no estructurales.

Resumen Medidas no Estructurales.	
<i>Descripción General.</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Estas no precisan ni una actuación directa sobre la red de drenaje ni la construcción de una infraestructura. Son de carácter preventivo, están enfocadas a prevenir la contaminación del agua antes de que la escorrentía llegue a producirse. - Estas medidas deben ser identificadas e integradas conjuntamente con el drenaje estructural, puesto que de esta manera se puede conseguir optimizar su funcionalidad. - Hay que tener en cuenta que no todas son idóneas para todos los usos del suelo, no es lo mismo una actuación sobre una zona residencial en la que se generan un tipo determinado de residuos que sobre una zona industrial, caracterizada por generar otro tipo de contaminantes. 	
Acciones ciudadanas para la gestión de la escorrentía.	<ul style="list-style-type: none"> • No depositar basura ni desechos directamente en las calles cuando se va a producir un evento pluviométrico, para prevenir que el agua de lluvia la arrastre y taponen los tragantes o vayan directos a alguna quebrada. • Cuidar que los vehículos no tengan fugas y repararlas en caso de que así sea para reducir la presencia de hidrocarburos contaminantes en la superficie viaria antes de las precipitaciones. • Potenciar el retardo del hidrograma con retenciones en los canales de los tejados con bajantes reducidos Si se permite que se acumule agua en los canalones durante el episodio pluviométrico antes de incorporarla a la red, se retarda su entrada a la red reduciendo el riesgo de que se colapse.
El mantenimiento viario.	<ul style="list-style-type: none"> • La limpieza de tragantes y rejas de recogida directa de aguas lluvia para evitar que se taponen y se inunden las calles al no poder entrar el agua pluvial. • La limpieza de calles y parqueos donde se acumulan grandes cantidades de contaminantes que pasarían rápidamente a la red de alcantarillado y, de ahí, al medio natural de no ser retirados a tiempo.
Gestión de la vegetación de parques, jardines y arriates.	<p>Con una correcta gestión de los restos de poda y siega se puede evitar aumentar la carga orgánica que supone la llegada de esos elementos a las quebradas.</p> <p>Recordar que el uso de herbicidas y pesticidas tóxicos acarrea consecuencias negativas, pues la lluvia los lava de las hojas y arrastra hasta llegar a un curso natural de agua, contaminándolo.</p>
<i>El desarrollo urbanístico como medida no estructural.</i>	

Resumen Medidas no Estructurales.	
Control del planeamiento urbanístico.	<p>Los nuevos planes de desarrollo y los de reurbanización deberían tratar de incorporar un sistema integral de la gestión de las aguas de escorrentía urbana siguiendo estos principios:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cada porción de terreno es parte de una cuenca más grande que ha de tenerse en cuenta en la planificación, ya que una gestión individual de una urbanización puede tener consecuencias negativas en otra situada agua abajo. (Regulado en el art. V.14 del reglamento de OPAMSS) - Procurar imitar y utilizar las características y funciones de la escorrentía que se producen en el medio natural, que generalmente está libre de costes y requieren un menor mantenimiento. - La guía HAUS especifica al respecto que se deben conservar las características naturales de escurrimiento y drenaje del agua de lluvia; evitando construir en zonas presentadas en el cuadro 50.
Crecimiento controlado de las ciudades.	<p>Con objeto de potenciar un crecimiento urbano controlado, la OPAMSS propone en su Estrategia 2 de la Guía HAUS la densificación en altura como medida de crecimiento urbano sostenible. Potenciando las edificaciones en altura se puede ofertar un mayor número de viviendas en un menor espacio, optimizando la cantidad de superficie impermeable por habitante, disminuyendo también el impacto hidrológico asociado a es mayor impermeabilización.</p>
Minimizar las áreas impermeables y reducir la compactación del suelo.	<p>Mermando la cantidad de superficies impermeables que se generan en cada nueva ampliación urbanística, se puede reducir considerablemente el volumen de escorrentía urbana. Un ejemplo de cómo la regulación puede lograr esto es el art. V.18 Área Verde, que especifica los porcentajes de área verde en proyectos habitacionales y que se muestran en el cuadro 51.</p>

Fuente: Elaboración propia a partir de información de OPAMSS, Capítulo 21, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020.

Cuadro 50. Características y funciones de la escorrentía que se producen en el medio natural.

Identificación	Características	Uso Recomendable
Zonas inundables.	Zonas de valles y depresiones; partes bajas de las montañas; drenes y erosión no controlada; suelo impermeable; vegetación escasa.	Zonas de recreación; zonas de preservación; almacenamiento de agua; recargas de acuíferos.
Cuerpos de agua.	Vegetación variable; suelo impermeable; localización en depresiones.	Almacenamiento temporal de agua para riego.
Arroyos o quebradas de poca inclinación.	Pendiente de 5% a 15%; seco o semi-seco en verano; con inundaciones durante lluvias; vegetación escasa; fauna escasa; susceptibilidad a erosión.	Drenaje natural; encauzarlo a lugar adecuado.

Zonas de acumulación de agua.	Clima húmedo; tierra muy blanda; fauna variada.	Conservación natural.
Quebradas de fuerte pendiente.	Pendientes mayores a 30°; humedad constante; alta erosión.	Drenaje natural.

Fuente: OPAMSS, Capítulo 21, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 4.

Cuadro 51. Porcentajes de área verde.

Zonas de Desarrollo Restringido		Área Máxima Construida
Área de Parcela (AP) (M ²)	Porcentaje de Área Verde. Calculado en base al área útil %	
500 - 624	25	25%
625 - 750	20	
751 - 1000	10	

Fuente: OPAMSS, Capítulo 21, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 5.

2.7 Los SUDS en la valoración económica.

A la hora de decidir qué elementos o infraestructuras de gestión hídrica implantar, suelen emplearse análisis económicos en los que generalmente se hace referencia al precio de cada técnica en cuestión por metro cúbico de agua gestionada. En dichos análisis económicos se consideran el valor económico asociado a cada tipo de infraestructura, la cuantía de su construcción, de mantenimiento y los beneficios financieros que conlleva, y es aquí donde surge uno de los principales desafíos, evaluar de forma justa y equitativa los SUDS frente a las infraestructuras grises tradicionales.

Muchos de los servicios prestado por los SUDS son de tipo no mercantil, es decir, no se compran ni se venden (como por ejemplo el confort térmico o el bienestar ciudadano), lo que complica el darles una tasación, por lo cual no se suelen incluir entre los beneficios. Otros muchos no se incluyen simplemente por desconocimiento entre promotores, administraciones públicas y la ciudadanía debido a que son técnicas relativamente nuevas. Y esa misma es la razón por la

que hay falta de datos históricos de costos y beneficios aprovechables, al contrario de lo que ocurre con las infraestructuras grises.

Esto aumenta la incertidumbre y, como resultado de esta incertidumbre, en los análisis se suelen emplear suposiciones conservadoras que, junto con la omisión de los beneficios asociados a los SUDS (lo que no son de carácter puramente hidráulico), pueden conducir a la subestimación del valor real del SUDS. A modo de ejemplo, se listan a continuación algunos de los beneficios potencialmente medibles aportados por los SUDS que deberían incluirse en los análisis económicos:

- **Costos evitados en las instalaciones de control de inundaciones localizadas.**
- **Costos evitados en tratamientos de calidad del agua.**
- **Costos evitados en operatividad y mantenimiento de infraestructuras grises.**
- **Número de nuevos puestos de trabajo "verdes".**
- **Ahorro energético por la menor necesidad de tratamiento, y en climatización (donde se coloquen cubiertas verdes).**
- **Reducción de las emisiones de CO₂ debido al ahorro energético, o al secuestro de carbono por la vegetación en los SUDS.**
- **Aumento del valor de las viviendas en lugares donde hay SUDS (por su mejora estética).**
- **Reducción de costes en salud por la mejora de la calidad del aire.**
- **Valor de los hábitats proporcionados por los SUDS con vegetación.**
- **Reducción de las muertes en las ciudades relacionadas con el calor o la contaminación.**
- **Valor de las mejoras de la calidad del agua y los hábitats acuáticos, basado en la disposición de los usuarios a pagar por ello.**
- **Aumento del número de días en que los ciudadanos pueden disfrutar de espacios recreativos asociados a SUDS.**
- **Beneficios de conservación del agua por la recarga de aguas subterráneas, basados en los costes evitados en traer agua desde lugares lejanos.**

Cómo cuantificar los beneficios.

Aunque pueda parecer difícil establecer un valor económico a las externalidades positivas de los *SUDS*, se puede estimar de una forma relativamente sencilla mediante dos pasos:

1. **Cuantificar el beneficio.** Definir la unidad del recurso a medir del beneficio de estudio. En el siguiente cuadro se muestran a modo de ejemplo simplificado algunos de los beneficios proporcionados por los *SUDS* junto a las unidades de medida del recurso aportado.

Cuadro 52. Ejemplos de cuantificación de beneficios.

Servicio	Beneficio (P/S) *	Recurso a medir	Unidad de medida del recurso
Reducción de los volúmenes de escorrentía y los caudales pico por infiltración en un SUDS con vegetación.	P: Reducción del volumen total de escorrentía	Volumen de agua que no se verterá directamente al medio.	m ³
	P: Reducción del caudal punta.	Caudal de escorrentía que acabará circulando por los colectores.	m ³ /s
	S: Recarga de acuífero.	Volumen de agua infiltrada.	m ³
	S: Mejora de la calidad del agua.	Contaminantes retenidos o eliminados.	Kg
	S: Mejora estética y de confort.	Valor de las viviendas adyacentes.	\$
	S: Absorción de CO ₂ por la vegetación.	CO ₂ absorbido por la vegetación según porte y tamaño.	kg de CO ₂
Infiltración de la escorrentía.	P: Reducción del volumen total de escorrentía.	Volumen de agua que no se verterá.	m ³
	S: Recarga de acuífero.	Volumen de agua infiltrada.	m ³
Retención de la escorrentía en una infraestructura verde.	P: Reducción del caudal punta.	Caudal de escorrentía.	m ³ /s
	S: Mejora estética.	Valor de las viviendas cercanas.	\$
	S: Absorción de CO ₂ por la vegetación.	CO ₂ absorbido por la vegetación según porte y tamaño.	kg de CO ₂

Fuente: OPAMSS, Capítulo 1, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 23.

*Los beneficios pueden ser primarios (P), son aquellos que constituyen el objetivo o motivo por el que se construye el elemento de drenaje y secundarios (S) o externalidades positivas, que son beneficios asociados a los primeros pero que no son objeto de consideración por no constituir la principal razón por la que se ejecutará la obra de drenaje.

Valoración económica de los beneficios cuantificados en el primer paso:

Cuadro 53. Ejemplos de valoración de beneficios.

Beneficio (P/S) *	Recurso a medir	Unidad de medida del recurso	Valoración económica
P: Reducción del volumen total de escorrentía.	Volumen de agua que no se verterá directamente al medio.	m ³	Gasto evitado en gestionar ese volumen con infraestructura gris (\$/m ³).
P: Reducción del caudal punta.	Caudal de escorrentía que se evitará ir directamente al medio.	m ³ /s	(Precio restauración de cauces/volumen erosionado) *(Volumen erosionado/caudal vertido) * Caudal no vertido por SUDS = Dinero ahorrado
S: Recarga de acuífero.	Volumen de agua infiltrada (para su posterior uso en la misma zona).	m ³	Precio extracción y transporte de agua/m ³ -Precio de extracción/m ³ = Dinero ahorrado
S: Mejora estética y de confort.	Valor de las viviendas adyacentes.	\$	Precio vivienda cerca de espacios verdes (\$) - Precio vivienda en zona sin espacios verdes (\$) = Ganancia económica
S: Absorción de CO₂ por la vegetación	CO ₂ absorbido por la vegetación según porte y tamaño.	Kg de CO ₂	Precio reducción kg CO ₂ atmosférico * Kg de CO ₂ retenidos = Dinero ahorrado

Fuente: OPAMSS, Capítulo 1, Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS, El Salvador, 2020, pág. 23.

Estos son sólo dos ejemplos de beneficios que se pueden medir en un área de bioretención, pero no los únicos. También podría medirse la cantidad de contaminantes atmosféricos absorbidos por las plantas (existen modelos como el

UFORE del servicio forestal de los Estados Unidos que tienen tabulados la eficacia de diversas especies en la retirada de varios contaminantes atmosféricos) junto con el precio que cuesta eliminar esa cantidad de contaminantes y así conocer el ahorro en limpieza atmosférica. Otro beneficio secundario sería el incremento del valor de las propiedades que hay junto a un área de bioretención, que se podría medir comparando con viviendas de iguales características pero que no tienen cerca un espacio verde.

La medición de las externalidades positivas de los SUDS puede resultar una tarea un tanto ardua, ya que ha de incluirse en la valoración económica elementos no contemplados con anterioridad en un sistema de drenaje, como la reducción del efecto isla de calor, o la mejora de la salud de las personas al disponer de un espacio verde cerca de casa.

CAPÍTULO III: IDENTIFICACION DE LOS SECTORES DE ESTUDIO Y DIAGNOSTICO

3.1 Introducción.

Dadas las condiciones existentes de drenaje en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), y tomando en cuenta las diversas afectaciones que puede conllevar una inundación urbana, no sólo en cuestiones de pérdidas o daños de infraestructura, sino también en la afectación a la cotidianidad de las actividades económicas y sociales de la ciudad, se hace importante encontrar una manera de valorar estos puntos de incidencia para ponderar los más críticos aptos para intervención mediante el diseño y la ejecución de un tipo de Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS).

El presente capítulo, es una revisión y análisis más específico de los datos y la documentación obtenida para la selección de sectores del AMSS, afectados por inundaciones frecuentes, que servirán como punto de estudio en este Trabajo de Graduación.

En primer lugar, se realizará una selección previa de sitios, que históricamente han tenido que lidiar con problemas de inundaciones urbanas; acorde con esto, en segundo lugar, se presentará la definición de criterios que servirán para ponderar y caracterizar cada uno de los sectores, lo cual se convierte en una herramienta muy útil para determinar si las condiciones son las más aptas para considerar diseñar e implementar un SUDS en ese sector o sectores determinados.

Los datos se presentarán mediante matrices que darán una mejor visión de la información recabada, y darán paso a la selección definitiva de los sectores a intervenir.

Finalmente, se justificará lo determinado en las matrices mediante cálculos hidráulicos de las condiciones actuales de los sistemas de drenaje existentes,

con lo que se logrará una comparativa de lo actual con lo proyectado y se tomarán las conclusiones y recomendaciones necesarias.

3.2 Identificación de Sectores de Estudio.

El AMSS históricamente se ha visto afectada por inundaciones durante las épocas lluviosas, debido principalmente a eventos como tormentas fuertes y/o temporales, que generan en muchos casos, escorrentía compleja de gestionar, principalmente por contar con un desarrollo ya existente, que con la impermeabilización se generan aumentos del flujo del agua lluvia.

Las condiciones de los sistemas de drenaje existentes y el crecimiento del porcentaje de impermeabilización de suelos, generada por el desarrollo urbanístico, son algunas de las causas que también influyen y generan condiciones para las inundaciones urbanas.

Dentro de esta problemática, pueden ser identificados puntos de interés, que servirán como referencia y punto de partida, para el estudio de las condiciones actuales y el desarrollo de la propuesta de drenajes con enfoque sostenible, que podrían desarrollarse en estos sectores.

Es de gran importancia para esta etapa de identificación de sitios, contemplar tanto la relevancia que genera el problema, como el impacto generado por las inundaciones urbanas, debido a que, de estas circunstancias depende la trascendencia de la propuesta, al dar posibles soluciones a las complicaciones antes mencionadas; también, se analizará la relevancia de cada sitio, para definir aquellos puntos que tienen un gran valor económico y cultural, y que su intervención sea de beneficio para el ecosistema y desarrollo urbano.

La búsqueda de información se ha realizado a partir de noticias y/o publicaciones periodísticas en diferentes medios de comunicación, tanto impreso como digital, informes en sitios web y de tipo oficial, proveniente de las instituciones Gubernamentales y Municipales relacionadas con el fenómeno de las

inundaciones, tales como la COAMSS/OPAMSS, la DGOA/MARN), MOPT, Sistema de Protección Civil (MIGOB) y otras.

Los sitios investigados se identificarán con un código, con el cual se definirá su ubicación y sus características (accesibilidad, uso del suelo y otros), que se reflejarán en una matriz, en mapas e imágenes, para evaluar cuales de estos serán analizados con más detalle en este Trabajo de Graduación.

A continuación, se presentan los sitios y la evidencia visual que se logró obtener en un listado de puntos potencialmente adecuados para analizar:

PTO. 01: Redondel Salvador del Mundo, San Salvador.



Fuente: <https://www.solonoticias.com/2018/05/29/calles-inundadas-deja-la-lluvia-percibida-por-pocos-minutos-en-san-salvador/>



Fuente: <https://www.elsalvadortimes.com/articulo/sucesos/fuertes-lluvias-hacen-colapsar-calles/20180815161307046927.html>

PTO. 02: Túnel Fuerza Aérea, San Salvador.



Fuente: <https://lanoticiasv.com/fuertes-lluvias-provocaron-graves-inundaciones-en-el-area-metropolitana-de-la-capital>



Fuente: <https://twitter.com/ElMundoSV/status/1306601978957410305?s=20>

PTO. 03: Entrada de emergencia Hospital Amatepec sobre Boulevard del Ejercito, Soyapango.



Fuente:
<https://www.solonoticias.com/2018/04/30/lluvias-causan-inundacion-en-hospital-amatepec-del-iss/>

Fuente:
<https://www.elsalvador.com/noticias/nacional/lluvias-inundan-el-area-de-emergencia-del-hospital-amatepec-del-iss/513999/2018/>

PTO. 04: Carretera Troncal del Norte km. 5, Ciudad Delgado.



Fuente: <https://www.elsalvador.com/fotogalerias/noticias-fotogalerias/carretera-troncal-del-norte-inundada/749363/2020/>

PTO. 05: Carretera Troncal del Norte km. 11 ½, Ciudad Delgado.



Fuente: <https://www.facebook.com/sucesosdelnorte/posts/406141609994383/>

PTO. 06: Carretera Troncal del Norte, paso a desnivel, Apopa.



Fuente:

<https://www.facebook.com/sucesosdelnorte/posts/406141609994383/>

PTO. 07: Paso a desnivel 49 Av. Sur y Alameda Roosevelt, San Salvador.



Fuente: <https://www.facebook.com/4vision/posts/49-avenida-sur-se-inunda-nuevamente-tras-minutos-de-lluvia-cuidado-si-transita-p/1897641783586615/>

PTO. 08: Paseo El Carmen, Santa Tecla.



Fuente: <https://elbloa.com/inicio/caos-en-santa-tecla-tras-fuertes-lluvias-el-paseo-el-carmen-termino-inundado/>

PTO. 09: Calle San Antonio Abad, Sector Redondel del Torogoz y Colonia San Luis.



Fuente: <https://www.solonoticias.com/2017/07/12/inundaciones-san-salvador-santa-tecla-soyapango-mas-tras-las-fuertes-lluvias/>

PTO. 10: Puente Paso a Desnivel Las Delicias, Santa Tecla.



Fuente: <https://www.scoopnest.com/es/user/noticias4vision/875334670963048448-acumulacin-de-aguas-lluvias-en-final-autopista-monseor-romero-con-direccin-a-las-delicias-santa-tecl>

PTO. 11: Paseo General Escalón, C.C. El Paseo, San Salvador.



Fuente:

https://www.facebook.com/permalink.php?id=240998629789730&story_fbid=635289883693934

PTO. 12: Entrada a residencia La Cima sobre Boulevard Luis Poma, Antiguo Cuscatlán.



Fuente: <https://www.lanoticiasv.com/lluvias-de-la-tarde-hicieron-colapsar-drenajes-en-el-bulevar-luis-poma-los-automovilistas-manejaban->

PTO. 13: Colonia Médica, llegando a los juzgados, San Salvador.



Fuente: https://www.facebook.com/permalink.php?id=309416356062558&story_fbid=1266193040384880

PTO. 14: Boulevard de los Próceres, San Salvador.



Fuente: <https://www.facebook.com/watch/?v=569941476997507>

PTO. 15: Sector Cementerio, Santa Tecla.



Fuente: <https://theworldnews.net/sv-news/inundaciones-y-arboles-caidos-a-causa-de-la-lluvia-en-santa->

PTO. 16: Intersección Boulevard de Los Héroes y Calle Gabriela Mistral, San Salvador.



Fuente: <https://twitter.com/dianavytony/status/1314289404735782912?s=20>

PTO. 17: Boulevard del Hipódromo, Zona Rosa, San Salvador.



Fuente: <https://twitter.com/alertux/status/1148019735583481858?s=20>

PTO. 18: Calle el Pedregal frente a Escuela Militar, por el paso a desnivel del redondel Naciones Unidas, Antiguo Cuscatlán.



Fuente: <https://www.lanoticiasv.com/fuerte-tormenta-azota-san-salvador-y-provoca-las-primas-inundaciones-de-la-temporada-lluviosa>

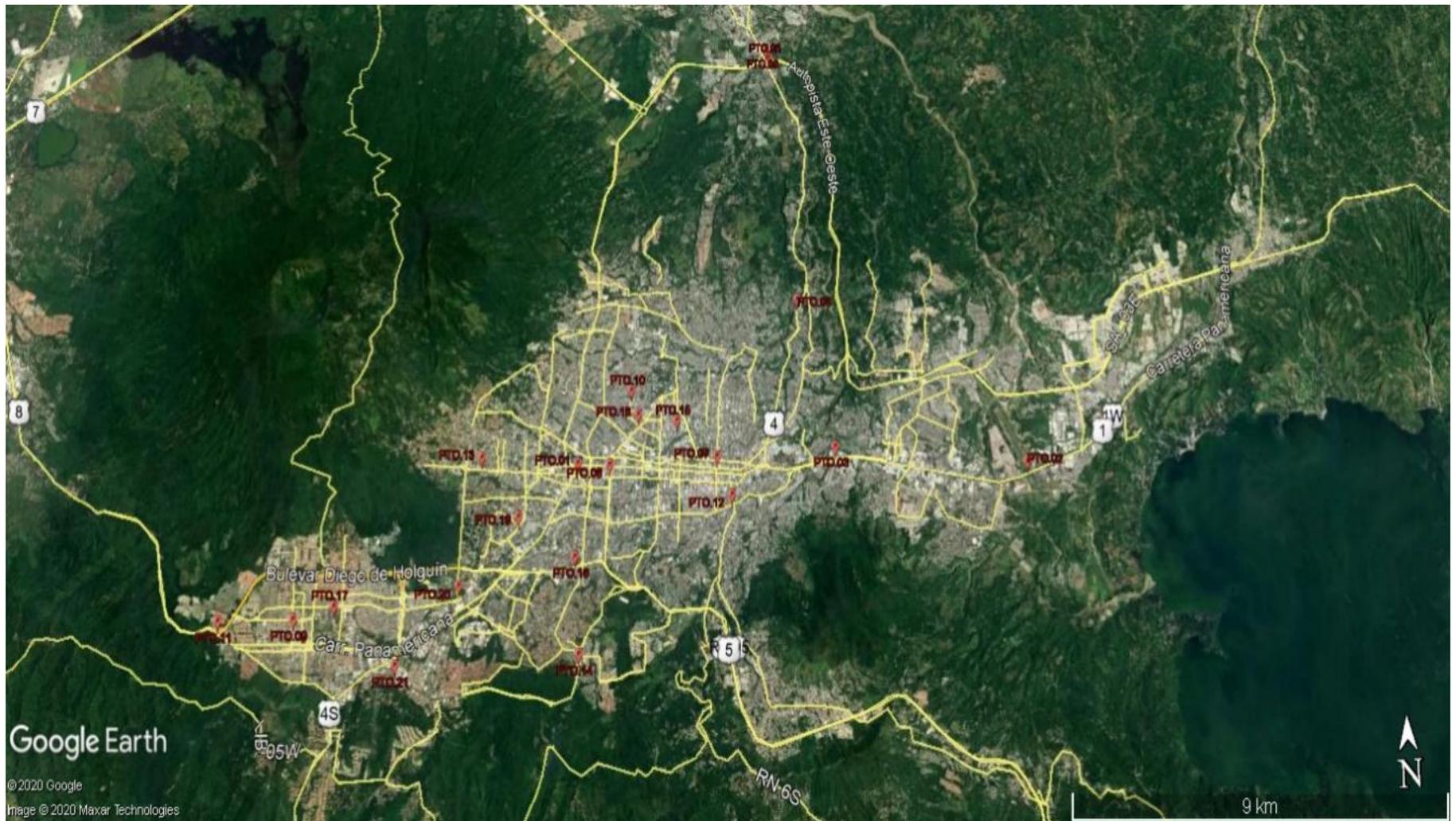
PTO. 19: Boulevard Orden de Malta, Antigua Cuscatlán.



Fuente: <https://twitter.com/alertux/status/991079517182676992?s=20>

Los puntos están ubicados en diferentes partes del AMSS (Fig. 61), por lo que se consideran representativos, y muestran que las condiciones de inundaciones urbanas son un problema general, por lo que se pueden aplicar, para cada sitio, las alternativas necesarias.

Fig. 61. Ubicación de los puntos de la matriz dentro del AMSS.



Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis

3.2.1 Criterios para la evaluación de los sectores identificados.

Los sectores de interés serán elegidos a partir de criterios que determinen la importancia, la trascendencia de los mismos, así como la información disponible; para esto, se presentará una matriz elaborada en base a datos de diversas fuentes, que permitirán seleccionar dichos sectores.

Los criterios para utilizar se definen de la siguiente manera:

Afectación por escorrentía: Mediante la observación de imágenes encontradas en la investigación, se definen los siguientes criterios para evaluar la afectación que la escorrentía genera en el sitio:

- Baja: Flujo lento de escorrentía, encharcamiento a nivel de acera y calzada.
- Medía: Flujo Lento de Escorrentía, afectación de tránsito de vehículos y peatones.
- Alta: Drenaje colapsado, inundación a nivel superior de llantas de vehículos y que representa una amenaza para el peatón.

En el siguiente cuadro se muestra el nivel de afectación que se considerará.

Cuadro 54. Calificación asignada a cada Nivel de Afectación por Escorrentía.

AFECTACIÓN POR ESCORRENTÍA	CALIFICACIÓN
BAJA	0 - 2
MEDIA	3 - 6
ALTA	7 - 10

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Accesibilidad: Se evalúa a través de la Jerarquía Vial, la cual define la importancia de las vías existentes en la cercanía del punto de estudio.

Estas pueden ser:

- Autopistas y vías expresas.
- Primaria.
- Secundaria.
- Colectora Principal.
- Vías de circulación menor.

Esta información será obtenida a través del Geoportal de OPAMSS, en el mapa del Esquema Director (Anexo 28 Información Vial)¹⁶.

Cuadro 55. Calificación asignada a cada nivel de accesibilidad.

ACCESIBILIDAD	CALIFICACIÓN
VÍAS DE CIRCULACIÓN MENOR	0 - 2
COLECTORA PRINCIPAL	3 - 4
SECUNDARIA	5 - 6
PRIMARIA	7 - 8
AUTOPISTAS Y VÍAS EXPRESAS	9 - 10

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Uso de suelo: Este criterio sirve para evaluar las condiciones y el tipo de edificaciones existentes en el sitio y de la importancia y afectación que éstas presentan en el caso de inundaciones urbanas; también dará una idea de la calidad de la escorrentía que se deberá gestionar. La información se puede obtener en el Geoportal de OPAMSS, en el mapa del Esquema Director (Anexo 33 Porcentaje de Impermeabilización del suelo) y en el mapa Levantamiento de los usos del suelo, año 2014¹⁷.

16

<https://geoportal.opamss.org.sv/portal/index.php/view/map/?repository=07&project=EsquemaDirector>

17

<https://geoportal.opamss.org.sv/portal/index.php/view/map/?repository=07&project=UsoSuelo2014>

Los usos de suelo que podremos encontrar en el AMSS según OPAMSS son:

- Baldío o en abandono.
- Áreas abiertas.
- Equipamiento.
- Recreativo Urbano.
- Habitacional.
- Industrial.
- Logístico.
- Comercio-servicios-oficinas.

Para evaluar este aspecto se tendrá lo siguiente.

Cuadro 56. Calificación asignada a cada tipo de uso de suelo.

USO DE SUELO	CALIFICACIÓN
RECREATIVO URBANO	0 - 2
HABITACIONAL	3 - 4
INDUSTRIAL	5 - 6
LOGISTICO	7 - 8
COMERCIO-SERVICIOS-OFFICINAS	9 - 10

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Afectación Socioeconómica: Nivel de incidencia de la inundación urbana en el punto estudiado, en los aspectos económicos y sociales de los actores involucrados (vehículos, peatones, edificaciones de la zona). Como parámetro se puede tomar el nivel de precariedad que existe en la zona, basándose en la clasificación que se presentó en el Mapa de pobreza y exclusión social¹⁸, estudio

¹⁸ Mapa de pobreza urbana y exclusión social, El Salvador, 2010:
http://www.pnud.org.sv/2007/component?option=com_docman/task_cat_view/gid,253/Itemid,9999/9999/?mosmsg=Est%E1+intentando+acceder+desde+un+dominio+no+autorizado.+%28www.google.com%29

realizado en 2010 por el gobierno de El Salvador. Al ponderar lo anterior, se toman para la clasificación lo siguiente;

- **Leve:** Las actividades se ven disminuidas, sin embargo, no hay grandes cambios en la cotidianidad de los procesos económicos y sociales.
- **Moderada:** Las actividades sociales y económicas se ven afectadas parcialmente, y representa retrasos en procesos y jornadas para las personas y comercios involucrados.
- **Grave:** Existe una gran afectación en el desarrollo cotidiano de las actividades económicas y sociales, limitando considerablemente el tránsito de vehículos y peatones, y aislando comercios e industrias.

Cuadro 57. Calificación asignada a cada tipo de uso de suelo.

AFECTACIÓN SOCIOECONOMICA	CALIFICACIÓN
LEVE	0 - 2
MODERADA	3 - 6
GRAVE	7 - 10

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Porcentaje de impermeabilización del suelo en los alrededores: Una mirada más clara de las condiciones del sitio se genera a partir de los datos del Geoportal de OPAMSS, que en su Anexo 33, proporciona la información necesaria para cada punto estudiado.

Cuadro 58. Calificación asignada a cada nivel de impermeabilización.

PORCENTAJE IMPERMEABILIZACIÓN	CALIFICACIÓN
70-80	0 - 2
80-90	3 - 6
90-100	7 - 10

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Existencia de Espacio intervenible: Es necesario definir las condiciones espaciales de la infraestructura presente en el área del sitio, por lo que se requiere de evaluar los espacios de acuerdo con la disponibilidad que el punto de estudio tiene para albergar un SUDS en el futuro. En este caso serán adecuados aquellos sitios que cuenten con aceras y arriates amplios, zonas verdes, plazas, y/o una baja densidad de áreas urbanizadas.

Cuadro 59. Calificación asignada a nivel de densidad urbana.

DENSIDAD URBANA	CALIFICACIÓN
BAJA	0 - 2
MEDIA	3 - 6
ALTA	7 - 10

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Información Disponible: Debido a que se requiere el conocimiento de las condiciones actuales de los puntos de estudio, es importante identificar si se cuenta con información suficiente en lo relativo a las dimensiones, pendientes instaladas, materiales, ubicación de pozos de visita, de la red de drenaje; áreas de aporte, datos hidrométricos y demás necesarios para la realización del análisis hidráulico de la red pluvial afectada en el sitio.

Cuadro 60. Calificación asignada según nivel de información disponible.

INFORMACIÓN DEL SECTOR	CALIFICACIÓN
NO DISPONIBLE	0 - 2
PARCIAL/ NO ACTUALIZADA	3 - 6
DISPONIBLE	7 - 10

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

3.2.2 Selección de los Sectores de Estudio.

Para la selección se definen dos matrices, una cualitativa y una cuantitativa, que sirven para la definir áreas de estudio específicas dentro del AMSS. La matriz cualitativa da una idea de los aspectos que cumplen o no cada uno de los

sectores, la matriz cualitativa realizará una valoración de estos criterios a partir de la información recabada, y definirá cuáles son los sectores más críticos de estudio.

A continuación, se presenta las matrices generadas para los posibles sectores de estudio identificados:

Matriz Cualitativa de Datos para selección de Sectores de Estudio:

CRITERIOS PARA EVALUAR		ESCORRENTÍA	ACCESIBILIDAD	USO DE SUELO	AFECTACION SOCIOECONÓMICO	% IMPERMEABILIZACIÓN	ESPACIO INTERVENIBLE	INFORMACION	CUMPLE
SITIOS									
PTO. 01	Redondel Salvador del Mundo, San Salvador.	Media	Secundaria	Tejido Urbano Continuo	Baja	90% - 100%	Adecuado	SI / NO ACTUALIZADA	SI
PTO.02	Túnel Fuerza Aérea, San Salvador.	Alta	Primaria	Tejido Urbano Continuo / Aeropuerto	Baja	70% - 80%	No Adecuado	NO	NO
PTO. 03	Entrada de emergencia Hospital Amatepec sobre Boulevard del Ejercito, Soyapango.	Alta	Primaria	Tejido Urbano Continuo	Baja	70% - 80%	Adecuado	NO	SI
PTO. 04	Carretera Troncal del Norte km. 5, Ciudad Delgado.	Media	Primaria	Tejido Urbano Continuo	Moderada	90% - 100%	No Adecuado	NO	NO
PTO. 05	Carretera Troncal del Norte km. 11 ½, Ciudad Delgado.	Baja	Primaria	Tejido Urbano Continuo	Baja	90% - 100%	No Adecuado	NO	NO
PTO. 06	Carretera Troncal del Norte, Paso a desnivel, Apopa.	Baja	Primaria	Tejido Urbano Continuo	Baja	90% - 100%	No Adecuado	NO	NO
PTO. 07	Paso a desnivel 49 Av. Sur y Alameda Roosevelt, San Salvador.	Alta	Secundaria	Tejido Urbano Continuo	Baja	90% - 100%	Adecuado	SI	SI
PTO. 08	Paseo El Carmen, Santa Tecla.	Baja	Vía de Circulación Menor	Tejido Urbano Continuo	Baja	70% - 80%	Adecuado	SI	NO
PTO. 09	Redondel El Torogoz, San Salvador.	No info.	Secundaria	Tejido Urbano Continuo	Baja	90% - 100%	Adecuado	NO	NO
PTO. 10	Puente Paso a desnivel Las Delicias, Santa Tecla.	Baja	Autopistas y Vías expresas	Bosque de Caducifóleos	Baja	0% - 0%	No Adecuado	NO	NO

Matriz Cualitativa de Datos para selección de Sectores de Estudio:

CRITERIOS PARA EVALUAR SITIOS		ESCORRENTÍA	ACCESIBILIDAD	USO DE SUELO	AFECTACION SOCIOECONÓMICO	% IMPERMEABILIZACIÓN	ESPACIO INTERVENIBLE	INFORMACION	CUMPLE
PTO. 11	Paseo General Escalón, C.C El Paseo San Salvador.	Media	Secundaria	Tejido Urbano Continuo	Moderada	90% - 100%	Adecuado	SI/NO ACTUALIZADOS	SI
PTO. 12	Entrada a Residencia La Cima sobre Boulevard Luis Poma, Antiguo Cuscatlán.	Media	Primaria	Bosque de Caducifóleos/Tejido Urbano Discontinuo	Baja	70% - 80%	Adecuado	PARCIAL	SI
PTO. 13	Colonia Médica, Ilegando a los Juzgados, San Salvador	Alta	Colectora Principal	Tejido Urbano Continuo	Grave	90% - 100%	Adecuado	SI	SI
PTO. 14	Boulevard de Los Próceres, San Salvador	Media	Primaria	Tejido Urbano Continuo	Moderada	90% - 100%	Adecuado	SI	SI
PTO. 15	Sector Cementerio, Santa Tecla	Alta	Vía de Circulación Menor	Tejido Urbano Continuo	Baja	70% - 80%	Adecuado	SI	SI
PTO. 16	Intersección Boulevard de Los Héroes y calle Gabriela Mistral, San Salvador.	Baja	Colectora Principal	Tejido Urbano Continuo	Baja	90% - 100%	Adecuado	SI	SI
PTO. 17	Boulevard del Hipódromo, Zona Rosa, San Salvador	Baja	Secundaria	Tejido Urbano Continuo	Baja	90% - 100%	Adecuado	SI	NO
PTO. 18	Calle El Pedregal frente a Escuela Militar, por el paso a desnivel del Redondel Naciones Unidas, Antiguo Cuscatlán.	Baja	Primaria	Tejido Urbano Discontinuo/Tejido Urbano Precario	Baja	70% - 80%	Adecuado	PARCIAL	NO

Matriz Cualitativa de Datos para selección de Sectores de Estudio:

CRITERIOS PARA EVALUAR		ESCORRENTÍA	ACCESIBILIDAD	USO DE SUELO	AFECTACION SOCIOECONÓMICO	% IMPERMEABILIZACIÓN	ESPACIO INTERVENIBLE	INFORMACION	CUMPLE
SITIOS									
PTO. 19	Boulevard Orden de Malta, Antiguo Cuscatlán.	Media	Primaria	Tejido Urbano Continuo	Moderada	90% - 100%	Adecuado	SI	SI

Matriz Cuantitativa de Datos para selección de Sectores de Estudio:

SITIOS	CRITERIOS PARA EVALUAR	AFECCIÓN POR ESCORRENTÍA	ACCESIBILIDAD	USO DE SUELOS	AFECCIÓN SOCIOECONÓMICA	IMPERMEABILIZACIÓN	ESPACIO INTERVENIBLE	INFORMACIÓN DISPONIBLE	CALIFICACIÓN
		20%	10%	10%	20%	15%	10%	15%	
PTO. 01	Redondel Salvador del Mundo, San Salvador.	4	7	8	7	9	9	5	6.70
PTO.02	Túnel Fuerza Aérea, San Salvador.	9	8	10	8	8	0	0	6.40
PTO. 03	Entrada de emergencia Hospital Amatepec sobre Boulevard del Ejercito, Soyapango.	9	9	10	8	8	0	0	6.50
PTO. 04	Carretera Troncal del Norte km. 5, Ciudad Delgado.	7	8	8	7	8	0	0	5.60

Matriz Cuantitativa de Datos para selección de Sectores de Estudio:

SITIOS	CRITERIOS PARA EVALUAR	AFECCIÓN POR ESCORRENTÍA	ACCESIBILIDAD	USO DE SUELOS	AFECCIÓN SOCIOECONÓMICA	IMPERMEABILIZACIÓN	ESPACIO INTERVENIBLE	INFORMACIÓN DISPONIBLE	CALIFICACIÓN
		20%	10%	10%	20%	15%	10%	15%	
PTO. 05	Carretera Troncal del Norte km. 11 ½, Ciudad Delgado.	7	8	8	7	8	0	0	5.60
PTO. 06	Carretera Troncal del Norte, Paso a desnivel, Apopa.	8	8	8	7	8	0	0	5.80
PTO. 07	Paso a desnivel 49 Av. Sur y Alameda Roosevelt, San Salvador.	10	8	10	9	9	0	10	8.45
PTO. 08	Paseo El Carmen, Santa Tecla.	8	5	10	7	10	8	10	8.30
PTO. 09	Redondel El Torogoz, San Salvador.	2	7	10	5	8	0	0	4.30
PTO. 10	Puente Paso a desnivel Las Delicias, Santa Tecla.	4	8	10	6	7	0	0	4.85
PTO. 11	Paseo General Escalón, C.C El Paseo San Salvador.	7	7	10	8	8	0	7	6.95
PTO. 12	Entrada a Residencia La Cima sobre Boulevard Luis Poma, Antiguo Cuscatlán.	6	7	5	6	8	0	8	6.00
PTO. 13	Colonia Médica, llegando a los Juzgados, San Salvador	9	8	10	8	9	6	10	8.65
PTO. 14	Boulevard de Los Próceres, San Salvador	8	9	10	9	9	7	8	8.55
PTO. 15	Sector Cementerio, Santa Tecla	9	5	10	6	9	8	10	8.15
PTO. 16	Intersección Boulevard de Los Héroes y calle Gabriela Mistral, San Salvador.	3	8	10	8	9	0	10	6.85
PTO. 17	Boulevard del Hipódromo, Zona Rosa, San Salvador	4	8	10	8	8	8	10	7.70
PTO. 18	Calle El Pedregal frente a Escuela Militar, por el paso a desnivel del Redondel Naciones Unidas, Antiguo Cuscatlán.	2	7	10	6	7	0	8	5.55
PTO. 19	Boulevard Orden de Malta, Antiguo Cuscatlán.	5	9	10	9	10	10	10	8.70

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en ambas matrices, es decir, los puntos que cumplen y los de calificación mayor a 7.00, se determina que los 3 sectores priorizados para ser estudiados son los siguientes:

- 1- PTO. 13. Colonia Médica, San Salvador.
- 2- PTO. 14. Boulevard de Los Proceres, San Salvador.
- 3- PTO. 19. Boulevard Orden de Malta, Antiguo Cuscatlán.

3.3 Diagnóstico de la Red de Drenaje Pluvial de los Sectores de Estudio.

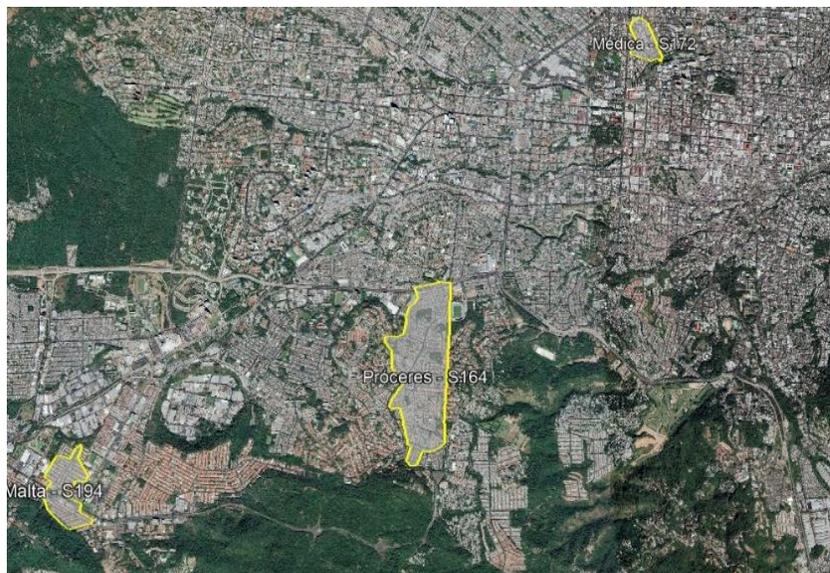
Para la realización del diagnóstico, se tomará en cuenta información obtenida del Plan Maestro para la Gestión Sustentable de las aguas de lluvias del Área Metropolitana de San Salvador, que, por simplicidad, en adelante, se mencionará como “Plan Maestro” y en el cual se han identificado las cuencas urbanas a las que pertenecen los sectores de estudio seleccionados. Para una mejor comprensión se presenta el Cuadro 61 con los sectores y sus respectivas microcuencas, con su código de identificación según el Plan Maestro; y también en la figura 62 se observan las cuencas urbanas delimitadas dentro del AMSS.

Cuadro 61. Cuencas urbanas correspondientes de cada Sector de Estudio.

SECTOR DE ESTUDIO	CODIGO DE LA CUENCA	UBICACIÓN DE LA CUENCA
Colonia Medica	S172	San Salvador
Boulevard de los Proceres	S164	San Salvador
Boulevard Orden de Malta	S194	Antiguo Cuscatlán

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Fig. 62. Ubicación de los Sectores de Estudio dentro del AMSS.



Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

3.3.1 Análisis Hidrológico.

- Áreas de las cuencas urbanas.

El área para cada cuenca se obtuvo mediante su digitalización a partir de los mapas resultado de la elaboración del Plan Maestro, en el que se muestran las microcuencas que conforman el AMSS.

Mediante la aplicación de programas de SIG, se calcularon las áreas de las cuencas en estudio.

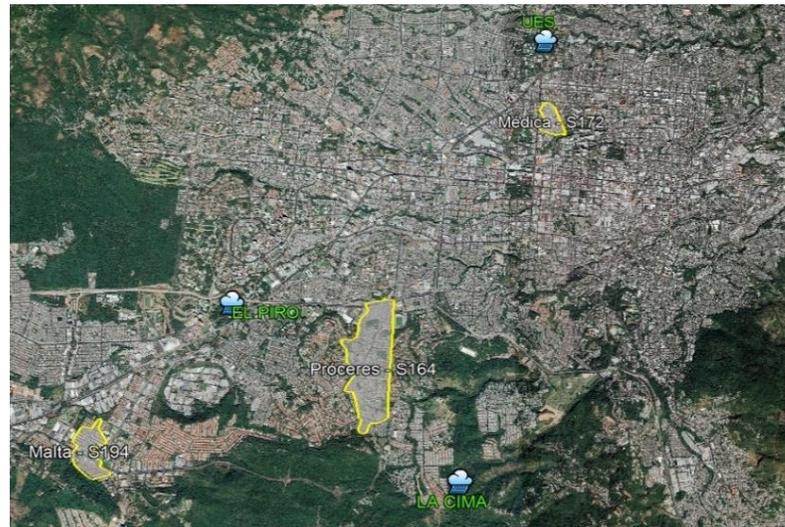
Tabla 1. Áreas de las cuencas urbanas a analizar.

SECTOR DE ESTUDIO	CUENCA URBANA	ÁREA DE LA CUENCA (m ²)	ÁREA DE LA CUENCA (km ²)
Colonia Medica	S172	118,638.24	0.119
Boulevard de los Proceres	S164	882,420.56	0.882
Boulevard Orden de Malta	S194	238,288.19	0.238

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Como la extensión de las cuencas urbanas es menor a 2.5 km² se realizará el análisis hidrológico a través del método racional y se presentan los cálculos

Fig. 63. Estaciones pluviométricas más cercanas a las cuencas.



Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis, con base a información proporcionada por OPAMSS.

detallados para la cuenca S172 únicamente y en anexos se presentan para las cuencas S164 y S194.

- **Red de drenaje en las cuencas**

En el Anexo 1: Mapas de las Cuencas Urbanas a Analizar, se presenta la red de drenaje de las tres cuencas, con la información proporcionada por COAMSS – OPAMSS.

- **Período de Retorno (Tr).**

El periodo de retorno se establece utilizando estándares de diseño o es escogido por el hidrólogo como un parámetro de diseño. Según el art. V. 62 Obras de Urbanización para aguas lluvia del RDOTAMSS, cuando se trate de colectores primarios dentro del sistema de aguas lluvias estos se deberán diseñar para un periodo de retorno de veinticinco años, por lo cual para el diagnóstico de las redes de drenaje se utilizará un $Tr = 25$ años.

- **Tiempo de Concentración (Duración de la lluvia).**

El tiempo de concentración es calculado acorde a lo determinado en el decreto N°18¹⁹, publicado en el Diario Oficial de la Republica de El Salvador, el 06 de enero de 2022, que reforma el artículo V.14 del RLDOT del AMSS, en el cual se establece que la forma para calcular el tiempo de concentración deberá ser mediante tres fórmulas reconocidas, pudiendo adoptar el tiempo que se considere más oportuno o un promedio de estos, siempre y cuando ese valor no sea mayor del promedio de todos los valores utilizados más el 50% de la diferencia entre el máximo y el mínimo de los tiempos considerados. En caso de que de que el valor máximo de los tres seleccionados sea mayor que el promedio más el 50% de la diferencia máxima, se podrá seleccionar cualquiera de los valores calculados o un promedio de esos con tal que el valor no exceda el tiempo máximo de concentración de cálculo.

Para el análisis hidráulico se consideraron las fórmulas de Kirpich, Témez y California Culverts Practice, siendo los resultados para la microcuenca S172 los siguientes:

¹⁹ La reforma se puede consultar en las páginas 88 y 89; en la página web de la imprenta nacional: <https://imprentanacional.gob.sv/ultima-publicacion-a-la-venta-del-diario-oficial/>

Tabla 2. Cálculo de la duración de la lluvia.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS	
Área (km ²)	0.12
L (m)	587.16
L (km)	0.59
Zmax (m)	690.85
Zmin (m)	666.11
Sm (m/m)	0.04
Sm (%)	4.21
TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN CALCULADOS	
TC1 (min) (Kirpich)	9.17
TC2 (min) (Témez)	9.22
TC3 (min) (California)	8.94
TCprom (min)	9.11

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

$$TC_{prom} + 0.5(TC_{max} - TC_{min}) = 9.25 \text{ min}$$

Como $TC_{max} = TC2 < TC_{prom} + 0.5(TC_{max} - TC_{min}) \rightarrow$ Se puede seleccionar cualquiera de los tres valores calculados.

$$\therefore TC_i = 0.65TC_c = 0.65 * (9.17) = 5.96 \text{ min} \approx \mathbf{6.0 \text{ min}}$$

- **Intensidad de la lluvia. (Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia)**

Las curvas IDF necesarias para el análisis son proporcionadas por COAMSS/OPAMSS, calculadas solo para fines académicos, no oficiales, de las estaciones pluviométricas más cercanas a los sectores de estudio las cuales son; estación de La Cima, El Piro, y UES (Gráficas 1, 2 y 3).

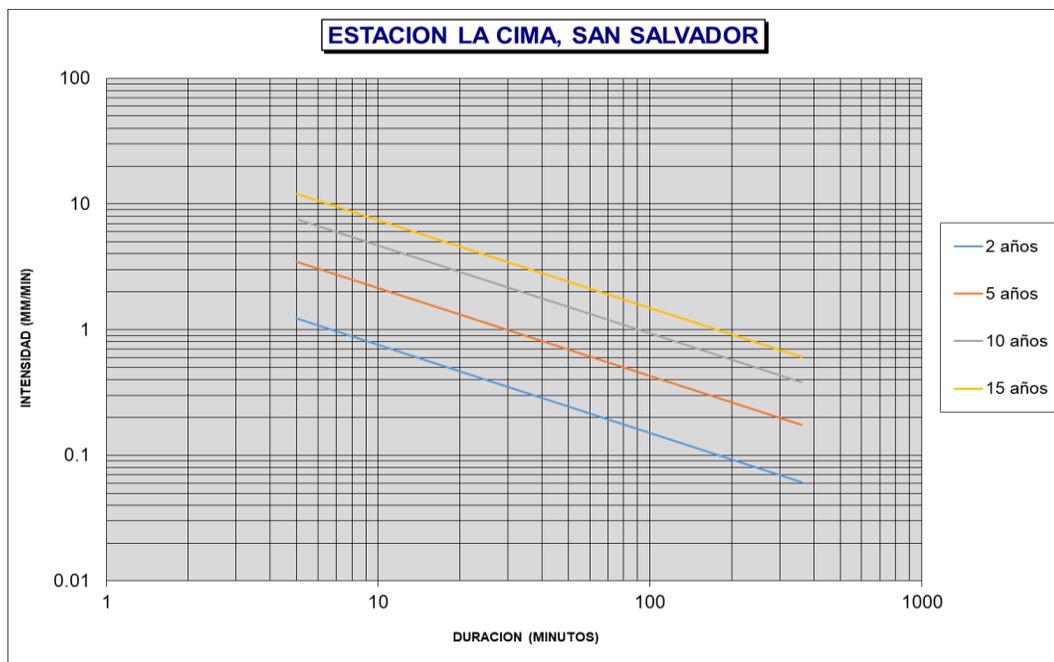
De las curvas IDF de cada estación se selecciona la intensidad de lluvia para cada cuenca urbana en base a la duración de lluvia de diseño y el periodo de retorno. A continuación, se presentan las curvas IDF obtenidas de cada estación.

Grafica 1. Curvas IDF Estación El



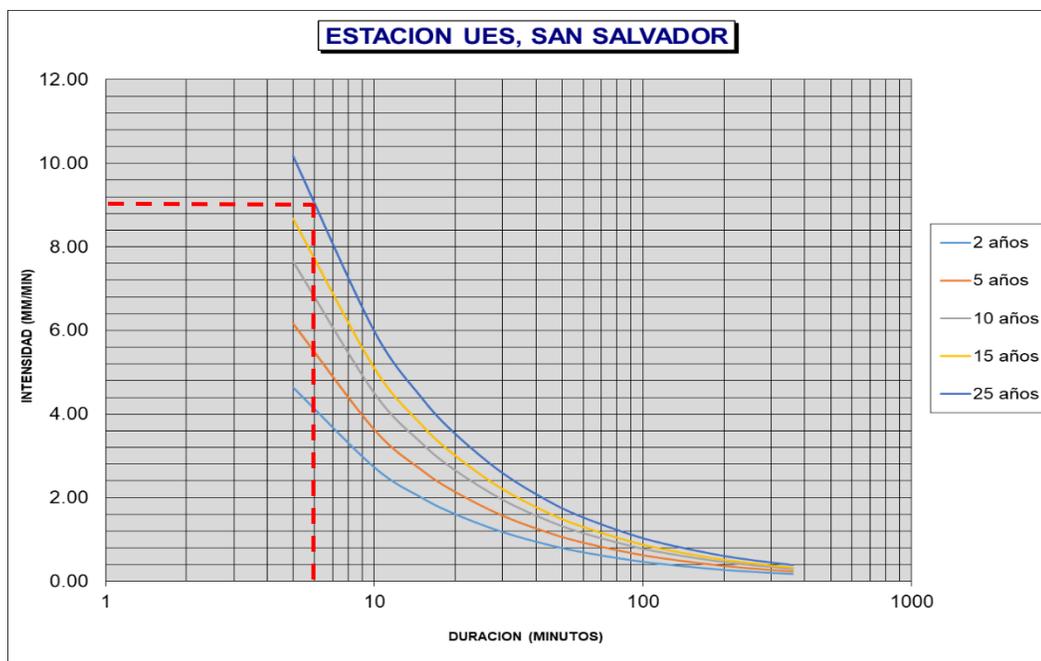
Fuente: COAMSS/OPAMSS. Elaboradas con base en información de estaciones de la Red del MARN, con fines únicamente académicos o investigativos y que no comprenden información oficial de la institución.

Grafica 2. Curvas IDF Estación La



Fuente: COAMSS/OPAMSS. Elaboradas con base en información de estaciones de la red del MARN, con fines únicamente académicos o investigativos y que no comprenden información oficial de la institución.

Grafica 3. Curvas IDF Estación UES.



Fuente: COAMSS/OPAMSS. Elaboradas con base en información de estaciones de la red del MARN, con fines únicamente académicos o investigativos y que no comprenden información oficial de la institución.

Se debe hacer la aclaración, que, debido al tiempo de vida y a los pocos registros de las estaciones de El Piro y La Cima, no se cuenta con una curva para el periodo de retorno de 25 años, por lo que se utilizará la intensidad obtenida con la curva IDF de la estación UES, para los tres sectores de estudio.

Con una duración de 6 minutos y un período de retorno de 25 años, se obtiene una Intensidad de 9.00 mm/min.

- **Coefficiente de Escorrentía ponderado.**

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA PONDERADO PARA CUENCA S172 (COLONIA MÉDICA)

Tabla 3. Áreas de superficies en la cuenca urbana.

SUPERFICIE	ÁREA	PORCENTAJE
Techos	88,276.70	74.41%
Calzada	20,356.64	17.16%
Área Verde	10,004.90	8.43%
Área total:	118,638.24	100.00%

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Estas áreas fueron obtenidas mediante la digitalización de las cuencas vistas desde Google Earth, y calculadas mediante una herramienta de SIG. En el Anexo: 2 Área de las Cuencas a Analizar, se puede observar las cuencas con las áreas mencionadas anteriormente.

El cálculo del coeficiente ponderado se hará utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{pon} = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i}$$

Ec. 42. Ecuación del coeficiente ponderado.

Donde:

C_{pon} : Coeficiente de escorrentía ponderado.

C_i : Coeficiente de escorrentía del área i.

A_i : Superficie del área i.

Los valores utilizados de C_i para las superficies son los representados en el Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de escorrentía.

SUPERFICIE	Ci
Techos	0.850
Calzada	0.838
Área Verde	0.350

Fuente: Art. V14 del Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los Municipios Aledaños.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo del coeficiente de escorrentía ponderado.

SUPERFICIE	Ai (m2)	Ci	Ai*Ci
TECHOS	88,276.70	0.850	75,035.20
CALZADA	20,356.64	0.838	17,058.86
Z. VERDE	10,004.90	0.350	3,501.72
TOTAL:	118,638.24		95,595.77

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

$$C_{pon} = \frac{95,595.77}{118,638.24} = 0.806$$

Por lo tanto, el coeficiente de escorrentía es igual a 0.81.

3.3.2 Análisis Hidráulico.

- **Capacidad hidráulica en los colectores (Caudal de trabajo).**

Utilizando la Ecuación de Manning, se obtiene la capacidad Hidráulica que posee cada colector del sistema.

$$Q_{LL} = \frac{0.399}{n} * A * D^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Ec. 43. Ecuación de Manning.

Donde:

Q_{LL} = Caudal evacuado por el colector, m³/seg

n = Coeficiente Manning del material de Tubería, adimensional.

A = Área interna del tubo, m².

D = Diámetro del colector, m.

S = Pendiente de la línea de Energía, m/m.

Los colectores de drenaje pluvial trabajan por gravedad y deben estar en condiciones de poder desalojar el caudal de diseño cuando éste trabaje hasta un 70% del tubo lleno, si trabaja con su máxima capacidad hidráulica, está muy cerca de entrar en presión (es decir, ya no trabajar por gravedad), condición que desde el diseño o evaluación no se aconseja por los materiales de las tuberías y de los suelos que bordean a las mismas. De lo anterior mencionado, se obtienen los resultados de la Tabla 7.

CAPACIDAD HIDRAULICA DE LA RED DE DRENAJE DE LA CUENCA S172 (COLONIA MÉDICA).

Tabla 6. Datos generales de la red de drenaje de la cuenca S172, Colonia Médica.

ID COLECTOR	POZO i	POZO f	DIAMETRO INTERNO		ÁREA INTERNA	LONGITUD	MATERIAL	COEFICIENTE (n)	PENDIENTE COLECTOR (m/m)
			(plg)	(m)					
0	P7344	P7345	18	0.450	0.6362	9.60	Concreto Simple	0.0140	0.1093
1	P7345	P7346	24	0.600	1.1310	61.85	Concreto Simple	0.0140	0.0222
2	P7347	P7346	18	0.450	0.6362	36.79	Concreto Simple	0.0140	0.0161
3	P7346	P7348	24	0.600	1.1310	51.24	Concreto Simple	0.0140	0.0407
4	P7348	P7349	24	0.600	1.1310	45.17	Concreto Simple	0.0140	0.0340
5	P7349	P7350	24	0.600	1.1310	47.27	Concreto Simple	0.0140	0.0264
6	P7350	P7351	24	0.600	1.1310	90.08	Concreto Simple	0.0140	0.0203
7	P7351	P7352	24	0.600	1.1310	76.89	Concreto Simple	0.0140	0.0291
8	P7352	P7353	30	0.750	1.7671	40.26	Concreto Simple	0.0140	0.0217
9	P7353	P7370	30	0.750	1.7671	15.95	Concreto Simple	0.0140	0.1547
10	P7354	P7355	18	0.450	0.6362	74.95	Concreto Simple	0.0140	0.0291
11	P7355	P7356	18	0.450	0.6362	75.11	Concreto Simple	0.0140	0.0333
12	P7356	P7357	18	0.450	0.6362	107.04	Concreto Simple	0.0140	0.0451
13	P7357	P7358	18	0.450	0.6362	36.90	Concreto Simple	0.0140	0.0246
14	P7358	P7359	18	0.450	0.6362	64.55	Concreto Simple	0.0140	0.0298
15	P7361	P7359	18	0.450	0.6362	51.79	Concreto Simple	0.0140	0.0201
16	P7359	P7360	24	0.600	1.1310	4.66	Concreto Simple	0.0140	0.0167
17	P7362	P7361	18	0.450	0.6362	90.34	Concreto Simple	0.0140	0.0276
18	P7360	P7369	24	0.600	1.1310	46.12	Concreto Simple	0.0140	0.0071
19	P7369	P7370	30	0.750	1.7671	109.31	Concreto Simple	0.0140	0.0190
20	P7370	P13656 VERTIDO	36	0.900	2.5447	68.32	Concreto Simple	0.0140	0.3299

Fuente: COAMSS/OPAMSS. Elaboradas con base en información de la red de drenaje pluvial Colonia Médica.

Tabla 7. Cálculo de la capacidad hidráulica de cada colector en cuenca S172.

ID COLECTOR	Q _{LL} (100%) (litros/s)	Q _{TRAB} (70%) (litros/s)
0	3519.93	2463.95
1	3419.29	2393.50
2	1349.40	944.58
3	4627.54	3239.28
4	4230.32	2961.23
5	3727.40	2609.18
6	3269.23	2288.46
7	3911.58	2738.10
8	6121.87	4285.31
9	16353.18	11447.23
10	1817.62	1272.33
11	1941.64	1359.15
12	2261.06	1582.74

13	1669.04	1168.33
14	1838.89	1287.22
15	1510.75	1057.53
16	2962.46	2073.72
17	1767.63	1237.34
18	1936.30	1355.41
19	5733.63	4013.54
20	38832.40	27182.68

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Utilizando la Ecuación de Manning, se tiene que el caudal a tubo lleno QLL del colector AB es igual a:

$$Q_{LL0} = \frac{0.399}{0.0140} * (0.64) * (0.45)^{\frac{2}{3}} * (0.1093)^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_{LL0} = 3.5199 \frac{m^3}{s} = 3,519.93 \frac{litros}{s}$$

De igual manera se obtienen los caudales a tubo lleno y a un 70% del tubo lleno para el resto de los colectores del sistema.

$$Q_{LL70\%0} = 3519.93 \frac{litros}{s} * 0.70$$

$$Q_{LL70\%0} = 2,463.95 \frac{litros}{s}$$

- **Caudal Hidrológico en Colectores.**

Se debe delimitar el área de influencia y/o tributaria que aportan el caudal hidrológico a cada colector, estas fueron obtenidas a partir de la distribución de tuberías indicadas en los mapas del Plan Maestro, y tomando en cuenta las pendientes y áreas calculadas a través de un software libre de SIG.

CAUDAL HIDROLOGICO EN COLECTORES DE LA RED DE DRENAJE DE LA CUENCA S172 (COLONIA MÉDICA).

Tabla 7. Áreas de influencia de cada colector en cuenca S172.

ID COLECTOR	Área de Influencia (m ²)
0	7634.83
1	9577.84
2	4935.78
3	6647.39
4	6000.67
5	6330.37
6	9836.22
7	8345.13
8	3984.59
9	754.8
10	9061.28
11	5835.37
12	13740.61
13	3920.17
14	4329.98
15	1249.58
16	672.17
17	8736.99
18	1695.48
19	2667.95
20	2681.04

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Con los anteriores datos de área de influencia ($A_{inf.}$) Intensidad de Lluvia (I) y Coeficiente de Escorrentía (C), se obtiene el caudal hidrológico en cada colector, y que representa un caudal parcial ($Q_{parcial}$) por colector, como se muestra en la Tabla 8:

$$Q_{Paro} = \frac{CIA_0}{60}$$

Ec. 44. Ecuación del Método Racional.

$$Q_{Paro} = \frac{(0.81) * (6) * (7,634.83)}{60}$$

$$Q_{Par0} = 615.196 \frac{\text{litros}}{\text{s}}$$

Tabla 8. Caudal parcial que llega a cada colector en cuenca S172.

ID COLECTOR	C _{pon}	INTENSIDAD (mm/min)	ÁREA DE INFLUENCIA (m ²)	*Q _{parcial} ²⁰ (litros/s)
0	0.806	9.00	7634.83	922.794
1	0.806	9.00	9577.84	1157.638
2	0.806	9.00	4935.78	596.570
3	0.806	9.00	6647.39	803.445
4	0.806	9.00	6000.67	725.279
5	0.806	9.00	6330.37	765.128
6	0.806	9.00	9836.22	1188.868
7	0.806	9.00	8345.13	1008.645
8	0.806	9.00	3984.59	481.603
9	0.806	9.00	754.8	91.230
10	0.806	9.00	9061.28	1095.203
11	0.806	9.00	5835.37	705.300
12	0.806	9.00	13740.61	1660.777
13	0.806	9.00	3920.17	473.816
14	0.806	9.00	4329.98	523.349
15	0.806	9.00	1249.58	151.032
16	0.806	9.00	672.17	81.243
17	0.806	9.00	8736.99	1056.008
18	0.806	9.00	1695.48	204.926
19	0.806	9.00	2667.95	322.465
20	0.806	9.00	2681.04	324.047

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

- **Cálculo del Caudal Acumulado en colectores de la Red.**

Con el cálculo de caudal parcial por colector, se procede a obtener el caudal acumulado en los mismos. Esto es posible al analizar la red de drenaje pluvial,

²⁰ *Q_{parcial} se refiere al caudal hidrológico (Q_{hidrológico}) que se obtiene a través del método racional y que es aportado por el área de influencia de cada colector.

visualizando el comportamiento del flujo del agua y las conexiones entre colectores.

CAUDAL ACUMULADO EN COLECTORES DE LA RED DE DRENAJE DE LA CUENCA S172 (COLONIA MÉDICA).

En el Anexo 1 se observa la distribución de la red y en la Tabla 9 sus respectivas conexiones.

Tabla 9. Conexiones entre colectores en cuenca S172.

ID COLECTOR	CONECTADO A
0	1
1	3
2	3
3	4
4	5
5	6
6	7
7	8
8	9
9	20
10	11
11	12
12	13
13	14
14	16
15	16
16	18
17	15
18	19
19	20
20	VERTIDO

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Esto es para conocer el caudal total que está evacuando cada colector, es decir, además del caudal que le genera su propia Área de Influencia (Q_{parcial}) éste debe desalojar el caudal proveniente de otros colectores que estén conectados a él

($Q_{\text{Acumulado}}$). En la Tabla 10 se presenta el cálculo del caudal acumulado en cada colector.

Tabla 10. Cálculo del Caudal Acumulado en cada colector en cuenca S172.

ID COLECTOR	Q_{Parcial} (litros/s)	Q_{ACUM} (litros/s)
0	615.196	922.79
1	771.759	2080.43
2	397.713	596.57
3	535.630	3480.45
4	483.519	4205.73
5	510.086	4970.85
6	792.578	6159.72
7	672.430	7168.37
8	321.068	7649.97
9	60.820	7741.20
10	730.136	1095.20
11	470.200	1800.50
12	1107.185	3461.28
13	315.878	3935.10
14	348.899	4458.45
15	100.688	1207.04
16	54.162	1288.28
17	704.005	1056.01
18	136.618	1493.21
19	214.977	1815.67
20	216.032	2139.72

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

- **Cálculo de la Carga Hidráulica en cada colector.**

Con lo anterior se puede conocer la Carga hidráulica y el porcentaje al cual está trabajando cada colector, además de cuánto más caudal puede soportar mediante la relación $Q_{\text{hidr}}/Q_{\text{LL70\%}}$.

PORCENTAJE DE TRABAJO EN COLECTORES DE LA RED DE DRENAJE DE LA CUENCA S172 (COLONIA MÉDICA).

En la Tabla 11 se muestra el cálculo del porcentaje de carga hidráulica en cada colector.

Tabla 11. Cálculo del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S172.

ID COLECTOR	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{restante} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% DE C.H.	EVALUACIÓN
0	922.79	1541.16	0.37	37.45	NORMAL
1	2080.43	313.07	0.87	86.92	NORMAL
2	596.57	348.01	0.63	63.16	NORMAL
3	3480.45	-241.17	1.07	107.45	COLAPSO
4	4205.73	-1244.50	1.42	142.03	COLAPSO
5	4970.85	-2361.68	1.91	190.51	COLAPSO
6	6159.72	-3871.26	2.69	269.16	COLAPSO
7	7168.37	-4430.26	2.62	261.80	COLAPSO
8	7649.97	-3364.66	1.79	178.52	COLAPSO
9	7741.20	3706.03	0.68	67.63	NORMAL
10	1095.20	177.13	0.86	86.08	NORMAL
11	1800.50	-441.35	1.32	132.47	COLAPSO
12	3461.28	-1878.54	2.19	218.69	COLAPSO
13	3935.10	-2766.77	3.37	336.81	COLAPSO
14	4458.45	-3171.23	3.46	346.36	COLAPSO
15	1207.04	-149.51	1.14	114.14	COLAPSO
16	1288.28	785.44	0.62	62.12	NORMAL
17	1056.01	181.33	0.85	85.34	NORMAL
18	1493.21	-137.80	1.10	110.17	COLAPSO
19	1815.67	2197.87	0.45	45.24	NORMAL
20	2139.72	25042.96	0.08	7.87	NORMAL

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

De donde:

$$Q_{Restante} = Q_{LL70\%} - Q_{Acumulado}$$

Ec. 45. Caudal restante que puede soportar el

Y

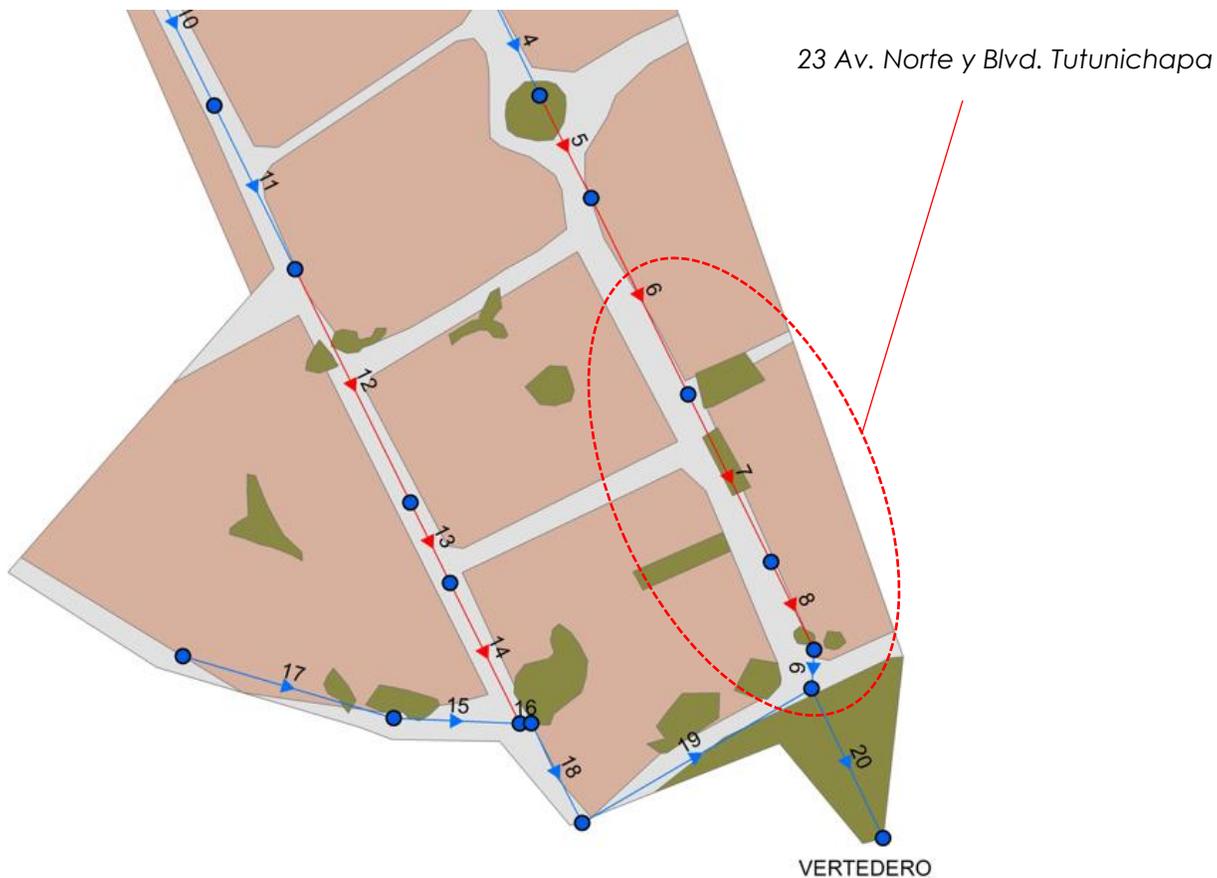
$$\text{Porcentaje de C. H. \%} = \frac{Q_{Acumulado}}{Q_{LL70\%}} * 100$$

Ec. 46. *Porcentaje de carga hidráulica en cada colector.*

Cuando la relación $Q_{\text{hidr}} / Q_{\text{LL70\%}}$ es menor o igual que 1 se concluye que el colector trabaja normalmente; si dicha relación excede de 1, significa que el colector debe evacuar un caudal mayor al de su diseño, por lo que rebalsaría su pozo de inicio y estaría trabajando bajo condiciones desfavorables para el sistema de drenaje.

Para el sistema de drenaje en el sector Colonia Médica se determina que el sistema trabaja actualmente bajo una condición de colapso. Como se observa en la Tabla 11, los colectores 5, 6, 7 y 8 trabajan sobre su capacidad de diseño (fig. 64), por lo que se presenta una inundación urbana en el sector lo cual repercute en el daño de la infraestructura y bienes públicos y privados, y que pone en riesgo al ciudadano e interrumpe sus actividades cotidianas. En el anexo 3 se puede observar cada colector con la dirección del flujo y su estado de trabajo, lo cual servirá de referencia para determinar un área potencial de aplicación de un SUDS en el sector.

Figura 64. Colectores Colapsados en Sector de Estudio, Colonia Médica.



Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por COAMSS/OPAMSS con fines académicos o investigativos y que no comprenden información oficial de la institución.

3.4 Resumen de Resultados Obtenidos en el Diagnostico de los Sectores de Estudio Prioritarios.

Dado el proceso anterior, en el que se presenta el paso a paso del cálculo realizado para la evaluación de la capacidad hidráulica del drenaje pluvial de cada cuenca, a continuación, se muestran los cuadros resumen de los resultados para las cuencas de Boulevard de los Próceres (S164) y Boulevard Orden de Malta (S194). Todos los cálculos y datos presentados se basan y han sido validados

mediante la información de curvas IDF y archivos shapes de conductos y nodos, proporcionados por COAMSS/OPAMSS y cumpliendo la normativa vigente.

3.4.1 Sector Boulevard de los Próceres. (Cuenca S164)

Para el sector del Boulevard de los Próceres, se obtuvieron los resultados de la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S164.

ID COLECTOR	Q _{LL70%} (litros/s)	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{restante} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% de C.H.	EVALUACION
0	1102.262	152.32	949.942	0.14	13.82	NORMAL
1	713.727	263.3	450.427	0.37	36.89	NORMAL
2	677.95	418.85	259.1	0.62	61.78	NORMAL
3	1093.764	340.85	752.914	0.31	31.16	NORMAL
4	1851.367	431.14	1420.227	0.23	23.29	NORMAL
5	624.344	951.01	-326.666	1.52	152.32	COLAPSO
6	388.948	187.92	201.028	0.48	48.31	NORMAL
7	4730.334	4305.53	424.804	0.91	91.02	NORMAL
8	5594.582	4352.94	1241.642	0.78	77.81	NORMAL
9	416.549	215.3	201.249	0.52	51.69	NORMAL
10	78.253	120.9	-42.647	1.54	154.50	COLAPSO
11	235.207	361.36	-126.153	1.54	153.63	COLAPSO
12	651.182	471.13	180.052	0.72	72.35	NORMAL
13	773.248	35.4	737.848	0.05	4.58	NORMAL
14	499.191	291.5	207.691	0.58	58.39	NORMAL
15	3330.446	2811.05	519.396	0.84	84.40	NORMAL
16	446.677	101.23	345.447	0.23	22.66	NORMAL
17	669.648	172.16	497.488	0.26	25.71	NORMAL
18	632.737	252.4	380.337	0.40	39.89	NORMAL
19	2890.853	443.34	2447.513	0.15	15.34	NORMAL
20	1212.652	378.73	833.922	0.31	31.23	NORMAL
21	514.724	182.69	332.034	0.35	35.49	NORMAL
22	2120.153	880.9	1239.253	0.42	41.55	NORMAL
23	3253.222	1880.35	1372.872	0.58	57.80	NORMAL
24	860.93	193.57	667.36	0.22	22.48	NORMAL
25	311.633	78.74	232.893	0.25	25.27	NORMAL
26	2331.14	3229.31	-898.17	1.39	138.53	COLAPSO
27	2512.237	3356	-843.763	1.34	133.59	COLAPSO
28	442.617	677.3	-234.683	1.53	153.02	COLAPSO
29	536.053	673.03	-136.977	1.26	125.55	COLAPSO
30	464.184	713.12	-248.936	1.54	153.63	COLAPSO
31	468.797	716.76	-247.963	1.53	152.89	COLAPSO
32	481.068	712.98	-231.912	1.48	148.21	COLAPSO

Tabla 12. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S164.

ID COLECTOR	Q _{LL70%} (litros/s)	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{restante} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% de C.H.	EVALUACION
33	530.278	784.34	-254.062	1.48	147.91	COLAPSO
34	650.433	857.65	-207.217	1.32	131.86	COLAPSO
35	658.42	935.84	-277.42	1.42	142.13	COLAPSO
36	421.295	641.08	-219.785	1.52	152.17	COLAPSO
37	320.005	467.14	-147.135	1.46	145.98	COLAPSO
38	191.583	283.28	-91.697	1.48	147.86	COLAPSO
39	145.607	219.03	-73.423	1.50	150.43	COLAPSO
40	304.003	332.62	-28.617	1.09	109.41	COLAPSO
41	809.774	818.73	-8.956	1.01	101.11	COLAPSO
42	49.049	75.79	-26.741	1.55	154.52	COLAPSO
43	436.429	367.19	69.239	0.84	84.14	NORMAL
44	666.96	568.23	98.73	0.85	85.20	NORMAL
45	1283.387	1940.53	-657.143	1.51	151.20	COLAPSO
46	1099.91	1309.68	-209.77	1.19	119.07	COLAPSO
47	240.373	150.5	89.873	0.63	62.61	NORMAL
48	254.611	239.05	15.561	0.94	93.89	NORMAL
49	1373.526	2048.5	-674.974	1.49	149.14	COLAPSO
50	3472.378	3847.24	-374.862	1.11	110.80	COLAPSO
51	3110.632	3771.5	-660.868	1.21	121.25	COLAPSO
52	2786.084	3662.53	-876.446	1.31	131.46	COLAPSO
53	2754.5	3551.63	-797.13	1.29	128.94	COLAPSO
54	2793.959	3449.36	-655.401	1.23	123.46	COLAPSO
55	335.727	511.49	-175.763	1.52	152.35	COLAPSO
56	6380.927	782.05	5598.877	0.12	12.26	NORMAL
57	1275.288	552.82	722.468	0.43	43.35	NORMAL
58	885.703	665.18	220.523	0.75	75.10	NORMAL
59	4267.004	1605.41	2661.594	0.38	37.62	NORMAL
60	1263.283	530.91	732.373	0.42	42.03	NORMAL
61	981.036	629.25	351.786	0.64	64.14	NORMAL
62	1416.814	716.34	700.474	0.51	50.56	NORMAL
63	7390.012	7153.92	236.092	0.97	96.81	NORMAL
64	668.941	600.23	68.711	0.90	89.73	NORMAL
65	743.54	214.57	528.97	0.29	28.86	NORMAL
66	329.966	316.09	13.876	0.96	95.79	NORMAL
67	992.537	1474.91	-482.373	1.49	148.60	COLAPSO
68	620.067	911.8	-291.733	1.47	147.05	COLAPSO
69	348.761	152.39	196.371	0.44	43.69	NORMAL
70	483.35	270.25	213.1	0.56	55.91	NORMAL
71	415.275	388.16	27.115	0.93	93.47	NORMAL
72	926.121	296.13	629.991	0.32	31.98	NORMAL
73	540.05	755.56	-215.51	1.40	139.91	COLAPSO
74	452.158	146.93	305.228	0.32	32.50	NORMAL

Tabla 12. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S164.

ID COLECTOR	Q _{LL70%} (litros/s)	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{restante} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% de C.H.	EVALUACION
75	379.106	251.77	127.336	0.66	66.41	NORMAL
76	528.801	168.46	360.341	0.32	31.86	NORMAL
77	637.602	658.79	-21.188	1.03	103.32	COLAPSO
78	33873.364	1502.56	32370.804	0.04	4.44	NORMAL
79	4493.923	742.86	3751.063	0.17	16.53	NORMAL
80	9698.864	3334.47	6364.394	0.34	34.38	NORMAL
81	2524.074	1161.53	1362.544	0.46	46.02	NORMAL
82	8656.06	3171.05	5485.01	0.37	36.63	NORMAL
83	3791.193	1834.27	1956.923	0.48	48.38	NORMAL
84	2049.544	1712.06	337.484	0.84	83.53	NORMAL
85	1785.28	1568.14	217.14	0.88	87.84	NORMAL
86	1994.216	1428.68	565.536	0.72	71.64	NORMAL
87	1515.556	1050.32	465.236	0.69	69.30	NORMAL
88	1901.928	249.23	1652.698	0.13	13.10	NORMAL
89	560.777	840.65	-279.873	1.50	149.91	COLAPSO
90	651.175	712.97	-61.795	1.09	109.49	COLAPSO
91	350.7	402.1	-51.4	1.15	114.66	COLAPSO
92	150.36	223.57	-73.21	1.49	148.69	COLAPSO
93	420.028	644.64	-224.612	1.53	153.48	COLAPSO
94	525.371	806.38	-281.009	1.53	153.49	COLAPSO
95	346.143	458.82	-112.677	1.33	132.55	COLAPSO
96	431.851	565.56	-133.709	1.31	130.96	COLAPSO
97	475.755	333.69	142.065	0.70	70.14	NORMAL
98	536.634	183.54	353.094	0.34	34.20	NORMAL
99	464.863	184.67	280.193	0.40	39.73	NORMAL
100	573.573	307.18	266.393	0.54	53.56	NORMAL
101	532.301	396.81	135.491	0.75	74.55	NORMAL
102	535.731	296.94	238.791	0.55	55.43	NORMAL
103	439.824	191.72	248.104	0.44	43.59	NORMAL
104	1221.696	518.85	702.846	0.42	42.47	NORMAL
105	500.703	124.21	376.493	0.25	24.81	NORMAL
106	508.053	69.33	438.723	0.14	13.65	NORMAL
107	1437.653	476.98	960.673	0.33	33.18	NORMAL
108	888.79	125.98	762.81	0.14	14.17	NORMAL
109	3134.908	1345.16	1789.748	0.43	42.91	NORMAL
110	2801.89	927.23	1874.66	0.33	33.09	NORMAL
111	1971.522	370.01	1601.512	0.19	18.77	NORMAL
112	827.729	457.14	370.589	0.55	55.23	NORMAL
113	484.274	110.68	373.594	0.23	22.85	NORMAL
114	553.756	257.38	296.376	0.46	46.48	NORMAL
115	487.375	162.21	325.165	0.33	33.28	NORMAL
116	3854.732	285.46	3569.272	0.07	7.41	NORMAL

Tabla 12. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S164.

ID COLECTOR	Q _{LL70%} (litros/s)	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{restante} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% de C.H.	EVALUACION
117	4060.112	188.67	3871.442	0.05	4.65	NORMAL
118	3037.097	1450.45	1586.647	0.48	47.76	NORMAL
119	9170.728	1541.38	7629.348	0.17	16.81	NORMAL
120	6951.28	1660.16	5291.12	0.24	23.88	NORMAL
121	8033.48	1808.34	6225.14	0.23	22.51	NORMAL
122	9529.912	1915.47	7614.442	0.20	20.10	NORMAL
123	1705.592	364.3	1341.292	0.21	21.36	NORMAL
124	395.976	314.31	81.666	0.79	79.38	NORMAL
125	4479.468	2382.55	2096.918	0.53	53.19	NORMAL
126	12391.288	2531.29	9859.998	0.20	20.43	NORMAL
127	10594.675	2686.94	7907.735	0.25	25.36	NORMAL
128	11453.988	2805.69	8648.298	0.24	24.50	NORMAL
129	10666.593	2925	7741.593	0.27	27.42	NORMAL
130	2859.885	3036.57	-176.685	1.06	106.18	COLAPSO
131	832.342	902.45	-70.108	1.08	108.42	COLAPSO
132	931.238	680.56	250.678	0.73	73.08	NORMAL
133	591.899	507.1	84.799	0.86	85.67	NORMAL
134	272.734	411.18	-138.446	1.51	150.76	COLAPSO
135	452.004	657.74	-205.736	1.46	145.52	COLAPSO
136	337.456	518.25	-180.794	1.54	153.58	COLAPSO
137	2069.27	690.2	1379.07	0.33	33.35	NORMAL
138	562.751	371.92	190.831	0.66	66.09	NORMAL
139	512.792	176.03	336.762	0.34	34.33	NORMAL
140	568.883	221.72	347.163	0.39	38.97	NORMAL
141	788.095	295.15	492.945	0.37	37.45	NORMAL
142	589.386	281.59	307.796	0.48	47.78	NORMAL
143	568.687	387.59	181.097	0.68	68.16	NORMAL
144	560.469	477.85	82.619	0.85	85.26	NORMAL
145	12709.732	6859.64	5850.092	0.54	53.97	NORMAL
146	735.203	553.46	181.743	0.75	75.28	NORMAL
147	14987.224	6927.66	8059.564	0.46	46.22	NORMAL
148	2809.989	4233.23	-1423.241	1.51	150.65	COLAPSO
149	2359.805	3507.14	-1147.335	1.49	148.62	COLAPSO
150	1352.057	743.74	608.317	0.55	55.01	NORMAL
151	1055.88	561.77	494.11	0.53	53.20	NORMAL
152	1156.988	405.82	751.168	0.35	35.08	NORMAL
153	522.41	86.69	435.72	0.17	16.59	NORMAL
154	1052.142	1433.29	-381.148	1.36	136.23	COLAPSO
155	554.008	586.33	-32.322	1.06	105.83	COLAPSO
156	585.046	787.92	-202.874	1.35	134.68	COLAPSO
157	513.387	402.99	110.397	0.78	78.50	NORMAL
158	510.426	490.14	20.286	0.96	96.03	NORMAL

Tabla 12. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S164.

ID COLECTOR	Q _{LL70%} (litros/s)	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{restante} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% de C.H.	EVALUACION
159	403.753	329.79	73.963	0.82	81.68	NORMAL
160	206.745	151.98	54.765	0.74	73.51	NORMAL
161	9340.471	6096.26	3244.211	0.65	65.27	NORMAL
162	1351.707	290.71	1060.997	0.22	21.51	NORMAL
163	1305.997	466.54	839.457	0.36	35.72	NORMAL
164	404.544	116.96	287.584	0.29	28.91	NORMAL
165	729.253	378.55	350.703	0.52	51.91	NORMAL
166	4461.177	1032.86	3428.317	0.23	23.15	NORMAL
167	1496.586	412.63	1083.956	0.28	27.57	NORMAL
168	5633.544	965.05	4668.494	0.17	17.13	NORMAL
169	2012.409	902.72	1109.689	0.45	44.86	NORMAL
170	4694.256	844.98	3849.276	0.18	18.00	NORMAL
171	1212.624	788.95	423.674	0.65	65.06	NORMAL
172	1006.068	149.39	856.678	0.15	14.85	NORMAL
173	1019.543	300.12	719.423	0.29	29.44	NORMAL
174	1285.291	213.12	1072.171	0.17	16.58	NORMAL
175	647.283	632.05	15.233	0.98	97.65	NORMAL
176	557.781	445.4	112.381	0.80	79.85	NORMAL
177	585.928	326.8	259.128	0.56	55.77	NORMAL
178	2733.514	118.33	2615.184	0.04	4.33	NORMAL
179	866.229	821.82	44.409	0.95	94.87	NORMAL
180	438.9	648.74	-209.84	1.48	147.81	COLAPSO
181	530.243	408.85	121.393	0.77	77.11	NORMAL
182	356.545	267.13	89.415	0.75	74.92	NORMAL
183	296.821	119.88	176.941	0.40	40.39	NORMAL
184	685.538	527.24	158.298	0.77	76.91	NORMAL
185	12612.117	7913.78	4698.337	0.63	62.75	NORMAL
186	502.187	414.49	87.697	0.83	82.54	NORMAL
187	662.277	132.46	529.817	0.20	20.00	NORMAL
188	321.09	484.44	-163.35	1.51	150.87	COLAPSO
189	593.418	124.33	469.088	0.21	20.95	NORMAL
190	633.5	107.25	526.25	0.17	16.93	NORMAL
191	258.174	185.44	72.734	0.72	71.83	NORMAL
192	516.005	503.65	12.355	0.98	97.61	NORMAL
193	498.757	687.35	-188.593	1.38	137.81	COLAPSO
194	11521.335	6721.77	4799.565	0.58	58.34	NORMAL
195	10386.691	5973.21	4413.481	0.58	57.51	NORMAL
196	6951.602	5736.98	1214.622	0.83	82.53	NORMAL
197	7564.907	5590.72	1974.187	0.74	73.90	NORMAL
198	661.486	825.96	-164.474	1.25	124.86	COLAPSO
199	425.523	216.91	208.613	0.51	50.97	NORMAL
200	561.904	185.43	376.474	0.33	33.00	NORMAL

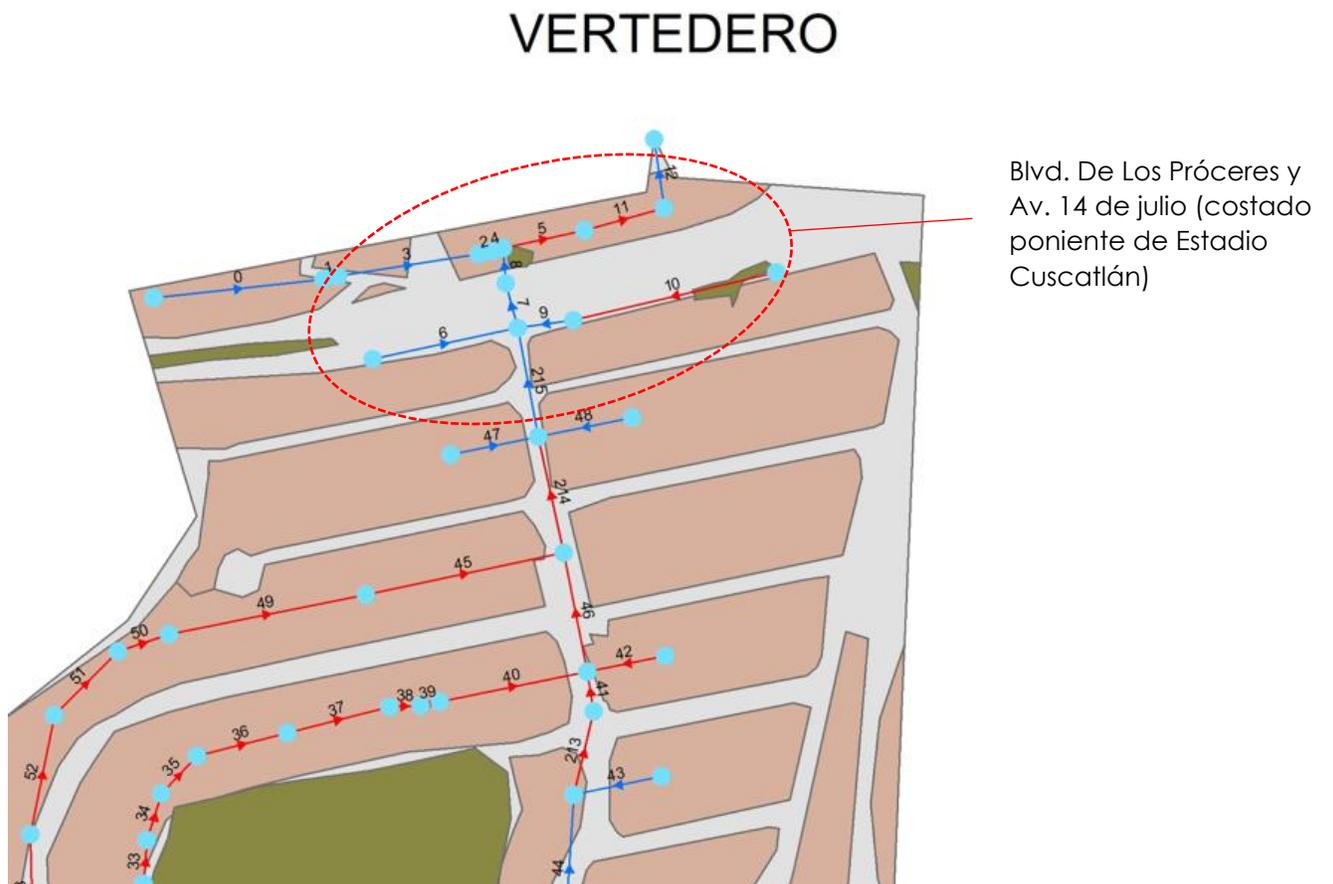
Tabla 12. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S164.

ID COLECTOR	$Q_{LL70\%}$ (litros/s)	* Q_{acum} (litros/s)	$Q_{restante}$ (litros/s)	$Q_{hidr}/Q_{LL70\%}$	% de C.H.	EVALUACION
201	5082.119	602.72	4479.399	0.12	11.86	NORMAL
202	5648.699	554.98	5093.719	0.10	9.82	NORMAL
203	3375.099	629.8	2745.299	0.19	18.66	NORMAL
204	437.584	318.3	119.284	0.73	72.74	NORMAL
205	872.144	500.45	371.694	0.57	57.38	NORMAL
206	7918.316	6361.24	1557.076	0.80	80.34	NORMAL
207	3375.379	2785.44	589.939	0.83	82.52	NORMAL
208	4431.168	2702.01	1729.158	0.61	60.98	NORMAL
209	3728.144	2591.67	1136.474	0.70	69.52	NORMAL
210	3897.376	2409.25	1488.126	0.62	61.82	NORMAL
211	1270.248	1580.57	-310.322	1.24	124.43	COLAPSO
212	1573.222	1496.33	76.892	0.95	95.11	NORMAL
213	507.465	778.19	-270.725	1.53	153.35	COLAPSO
214	2399.082	3323.01	-923.928	1.39	138.51	COLAPSO
215	5997.656	3826.17	2171.486	0.64	63.79	NORMAL
216	19520.487	6330.23	13190.257	0.32	32.43	NORMAL
217	12004.93	8064.55	3940.38	0.67	67.18	NORMAL
218	9957.941	9048.05	909.891	0.91	90.86	NORMAL
219	3891.223	2910.49	980.733	0.75	74.80	NORMAL
220	3606.099	2856.98	749.119	0.79	79.23	NORMAL
221	3885.336	2496.38	1388.956	0.64	64.25	NORMAL

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Para el sistema de drenaje en el sector Boulevard de Los Próceres se determina que el sistema trabaja actualmente bajo una condición de colapso. Como se observa en la Tabla 12, los colectores 5, 10 y 11 trabajan sobre su capacidad de diseño (fig. 65), por lo que se presenta una inundación urbana en el sector. También es importante señalar la cantidad de colectores colapsados aguas arriba del colector 215, que junto con la topografía del lugar propician que la escorrentía que no puede ser transportada por los colectores, llegue finalmente al sector estudiado. Esto repercute en el daño de la infraestructura y bienes públicos y privados, y que pone en riesgo al ciudadano e interrumpe sus actividades cotidianas. En el anexo 3 se puede observar cada colector con la dirección del flujo y su estado de trabajo, lo cual servirá de referencia para determinar un área potencial de aplicación de un SUDS en el sector.

Figura 65. Colectores Colapsados en Sector de Estudio, Boulevard Los Próceres.



Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por COAMSS/OPAMSS con fines académicos o investigativos y que no comprenden información oficial de la institución.

3.4.2 Sector Boulevard Orden de Malta. (Cuenca S194)

Para el sector del Boulevard de los Proceres, se obtuvieron los resultados de la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S194.

ID COLECTOR	Q _{LL70%} (litros/s)	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{restante} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% DE C.H.	EVALUACIÓN
0	949.19	110.22	838.97	0.12	11.61	NORMAL
1	603.88	529.14	74.74	0.88	87.62	NORMAL
2	524.75	667.73	-142.98	1.27	127.25	COLAPSO
3	691.17	1010.86	-319.69	1.46	146.25	COLAPSO
4	252.38	379.37	-126.99	1.50	150.32	COLAPSO
5	1424.30	1097.44	326.86	0.77	77.05	NORMAL
6	822.28	1263.73	-441.45	1.54	153.69	COLAPSO
7	644.21	970.72	-326.51	1.51	150.68	COLAPSO
8	1448.57	1198.58	249.99	0.83	82.74	NORMAL
9	2373.88	1714.08	659.80	0.72	72.21	NORMAL
10	851.09	1297.62	-446.53	1.52	152.47	NORMAL
11	1399.55	1667.46	-267.92	1.19	119.14	COLAPSO
12	2207.49	1832.10	375.39	0.83	82.99	NORMAL
13	2230.77	3078.44	-847.67	1.38	138.00	COLAPSO
14	1424.04	2165.48	-741.44	1.52	152.07	COLAPSO
15	5918.19	2427.27	3490.92	0.41	41.01	NORMAL
16	5645.01	2625.05	3019.96	0.47	46.50	NORMAL
17	3691.04	2863.49	827.55	0.78	77.58	NORMAL
18	110.12	162.23	-52.11	1.47	147.32	COLAPSO
19	132.77	202.96	-70.19	1.53	152.87	COLAPSO
20	802.97	195.95	607.02	0.24	24.40	NORMAL
21	59.18	91.37	-32.19	1.54	154.40	COLAPSO
22	307.09	261.66	45.43	0.85	85.21	NORMAL
23	240.88	186.82	54.06	0.78	77.56	NORMAL
24	689.84	144.71	545.13	0.21	20.98	NORMAL
25	361.76	343.79	17.97	0.95	95.03	NORMAL
26	309.13	459.97	-150.84	1.49	148.79	COLAPSO
27	492.70	223.75	268.95	0.45	45.41	NORMAL
28	319.00	268.98	50.02	0.84	84.32	NORMAL
29	255.17	240.91	14.26	0.94	94.41	NORMAL
30	228.61	231.68	-3.07	1.01	101.34	COLAPSO
31	257.11	388.24	-131.13	1.51	151.00	COLAPSO

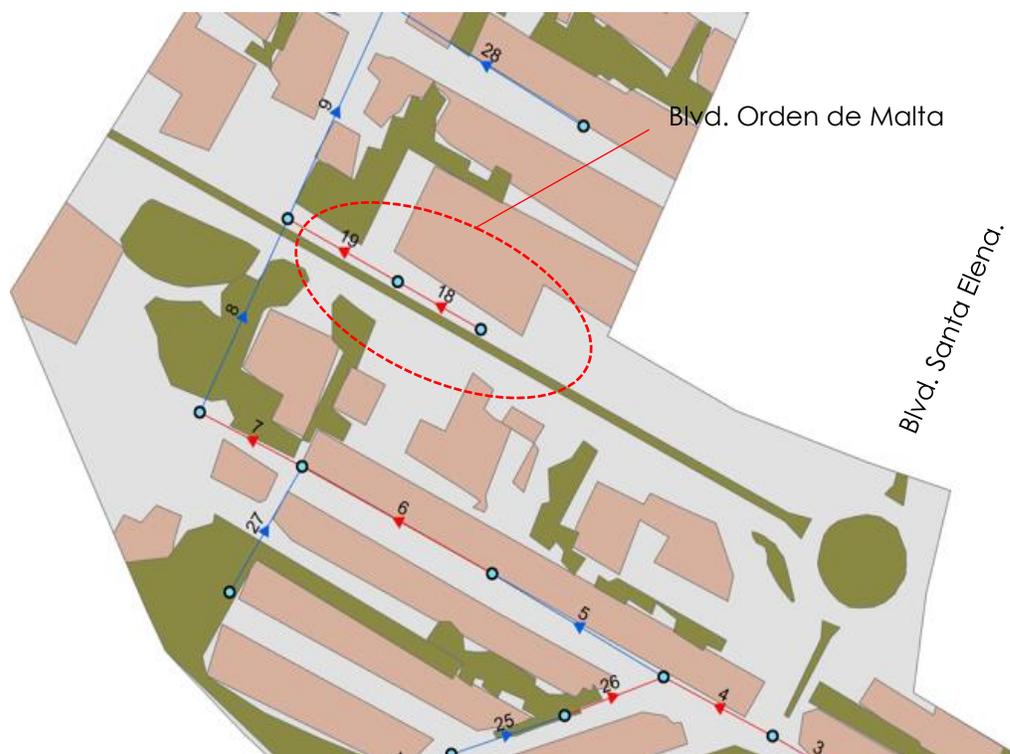
Tabla 13. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S194.

ID COLECTOR	$Q_{LL70\%}$ (litros/s)	* Q_{acum} (litros/s)	$Q_{restante}$ (litros/s)	$Q_{hidr}/Q_{LL70\%}$	% DE C.H.	EVALUACIÓN
32	280.39	255.49	24.90	0.91	91.12	NORMAL
33	241.37	225.25	16.12	0.93	93.32	NORMAL
34	226.46	344.30	-117.84	1.52	152.03	COLAPSO
35	722.79	478.15	244.64	0.66	66.15	NORMAL
36	1611.81	675.41	936.40	0.42	41.90	NORMAL
37	224.22	193.73	30.49	0.86	86.40	NORMAL

Fuente: Elaboración propia.

Para el sistema de drenaje en el sector Boulevard Orden de Malta se determina que el sistema trabaja actualmente bajo una condición de colapso. Como se observa en la tabla 13, los colectores 18 y 19 trabajan sobre su capacidad de diseño (fig. 66), por lo que se presenta una inundación urbana en el sector lo cual

Figura 66. Colectores Colapsados en Sector de Estudio, Boulevard Orden de Malta.



Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis, con base en información proporcionada por COAMSS/OPAMSS con fines académicos o investigativos y que no comprenden información oficial de la institución.

repercute en el daño de la infraestructura y bienes públicos y privados, y que pone en riesgo al ciudadano e interrumpe sus actividades cotidianas. En el anexo 3 se puede observar cada colector con la dirección del flujo y su estado de trabajo, lo cual servirá de referencia para determinar un área potencial de aplicación.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DE SITIOS DE INUNDACIÓN EN EL AMSS

4.1 Introducción.

En este capítulo se desarrollará la propuesta de técnicas SUDS, con la que se pretende mitigar y gestionar las inundaciones en los sectores de estudio.

Se presentará la cadena de drenaje que se establecerá para estos sectores, describiendo los eslabones con los que contará. En el primer eslabón se considerarán algunas medidas preventivas y no estructurales, las cuales ayudarían a conseguir el objetivo de controlar mejor los volúmenes de escorrentía que se tendrían en cada sector; luego como base, en el segundo eslabón para controlar la escorrentía se propone usar cunetas verdes sin vegetación y protegidas del tráfico vehicular y peatonal, para captar y transportar la escorrentía hacia el siguiente eslabón, que será el control local, o punto vertedero, dependiendo de las condiciones de la cuenca, según se determinó de manera conveniente para cada uno de los tres sectores en estudio.

Luego se presentará el diseño conceptual de las técnicas SUDS que serían propuestas, que les permitirán integrarse entre sí y con toda la estructura hidráulica existente, con el fin de aliviar de esta manera la carga hidráulica que transitaría en el drenaje convencional existente; cabe señalar que no se busca eliminar la condición de sobre trabajo o de colapso en la red convencional dado que se requeriría muchas más intervenciones, pero sí se buscará disminuir los caudales pico y volúmenes de escorrentía, entre un 10% a un 20%, en algunos

casos, considerando las condiciones que se determinaron en el Diagnóstico del Capítulo anterior, datos que se presentan en una matriz de resultados, para los colectores con caudal excedente.

4.2 Propuesta de Técnicas SUDS a Aplicar en los Sectores de Estudio.

4.2.1 Establecimiento de la Cadena de Drenaje.

El objetivo principal que se busca aplicando las técnicas SUDS en estos sectores, es el de controlar parte de los volúmenes de escorrentía en la superficie que generan las inundaciones urbanas. Si bien en estos sectores se cuenta con una red de microdrenaje deficiente, tal como ya se determinó en el Capítulo anterior, no se busca solucionar el problema en su totalidad, pero si mitigar parte de este y lograr aliviar parcialmente la alta demanda hidráulica de la red de drenaje existente.

Para esto, a continuación, se conceptualiza la Cadena de Drenaje como sigue:

- **Eslabón 1: Prevención-medidas no estructurales.**
 1. Instalación de depósitos para desechos sólidos que sean suficientes para el área de la microcuenca y zonas cercanas (aledañas), para minimizar la cantidad de basura y contaminantes en las calles y aceras circundantes.
 2. Limpieza de calles, parqueos y aceras para evitar que desechos contaminantes se transporten hasta la red de alcantarillado, y técnicas SUDS a instalar.
 3. Limpieza periódica de tuberías, tragantes y rejillas de recolección directa de aguas lluvia; con más frecuencia en época de lluvia y restauración de aquellas que lo necesiten, para asegurarles un funcionamiento eficiente.
 4. Promover e incentivar los beneficios de instalar técnicas SUDS, en edificaciones existentes tales como, depósitos de almacenamiento y la reutilización del agua lluvia para riego de jardines y/o descarga en inodoros; con el fin de retardar y disminuir el caudal máximo, durante un evento lluvioso.

- **Eslabón 2: Control en origen.**
 1. Construir cunetas verdes con zanjas, que permitan captar, almacenar y retener escorrentía que precipite sobre la calzada y conducirla hasta el siguiente eslabón.

- **Eslabón 3: Control Local.**

1. Construir Pozos de infiltración que almacenen e infiltren escorrentía de manera que se disminuyan los caudales pico en la red de drenaje convencional.

4.2.2 Diseño de Técnicas SUDS a aplicar.

Cunetas verdes.

Para el diseño de estos SUDS se tomará como base lo planteado en la Guía técnica de COAMSS-OPAMSS, de la cual se utilizará la *Ecuación 28*, para el cálculo de la sección de canaletas, además de la utilización del programa “The Open Flow Chanel Calculator” (Dr. Xing Fang, Department of Civil Engineering, Lamar University.), para a la verificación de velocidades y tirantes en secciones de cunetas.

Cuneta Verde C1: Cuneta rectangular de dimensiones de 0.60 metros de ancho y 0.40 metros de profundidad, la cual tendrá agregados gruesos para la reducción de velocidad y control de sólidos gruesos conducidos por la escorrentía, tales como basura y otros que pudieran generar obstrucciones de cajas tragantes existentes en el drenaje convencional.

Figura 67. Cálculo de sección tipo C1

The open channel flow calculator			
Select Channel Type: Rectangle			
Depth from Q	Select unit system: Meter(m)		
Channel slope: 0.023 m/m	Water depth(y): 0.29 m	Bottom W(b): 0.6 m	
Flow velocity: 1.190476 m/s	LeftSlope (Z1): 0 z1/y	RightSlope (Z2): 0 z2/y	
Flow discharge: 0.21 m³/s	Input n value: 0.035 or select n		
Calculate!	Status: Calculation finished	Reset	
Wetted perimeter: 1.19 m	Flow area: 0.18 m²	Top width(T): 0.6 m	
Specific energy: 0.37 m	Froude number: 0.7	Flow status: Subcritical flow	
Critical depth: 0.24 m	Critical slope: 0.0404 m/m	Velocity head: 0.07 m	

Copyright 2000 Dr. Xing Fang, Department of Civil Engineering, Lamar University.

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis, con base en información proporcionada por COAMSS/OPAMSS

Cuneta Verde C2: Cuneta rectangular de dimensiones de 0.60 metros de ancho y 0.50 metros de profundidad, la cual tendrá agregados gruesos para la reducción de velocidad y control de sólidos gruesos conducidos por la escorrentía, tales

como basura y otros que pudieran generar obstrucciones de cajas tragantes existentes en el drenaje convencional.

Figura 68. Cálculo de sección tipo C2

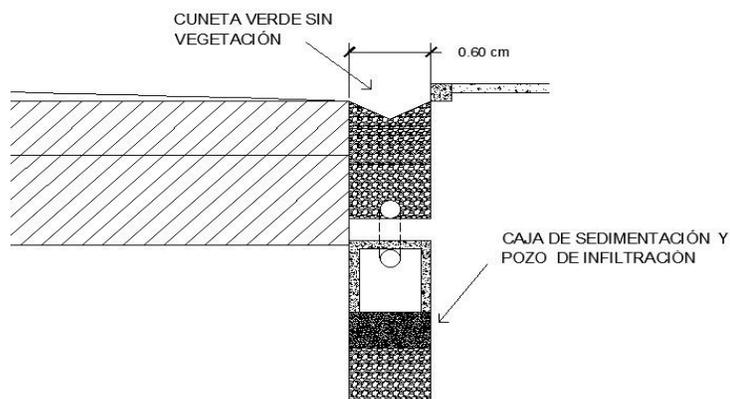
The open channel flow calculator			
Select Channel Type: Rectangle			
Depth from Q	Select unit system: Meter(m)		
Channel slope: 0.02 m/m	Water depth(y): 0.43 m	Bottom W(b): 0.6 m	
Flow velocity: 1.256184 m/s	Left Slope (Z1): 0 z1/y	Right Slope (Z2): 0 z2/y	
Flow discharge: 0.325 m³/s	Input n value: 0.035 or select n		
Calculate!	Status: Calculation finished	Reset	
Wetted perimeter: 1.46 m	Flow area: 0.26 m²	Top width(T): 0.6 m	
Specific energy: 0.51 m	Froude number: 0.61	Flow status: Subcritical flow	
Critical depth: 0.31 m	Critical slope: 0.0445 m/m	Velocity head: 0.08 m	
Copyright 2000 Dr. Xing Fang, Department of Civil Engineering, Lamar University.			

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis. con base en información proporcionada por COAMSS/OPAMSS

Además, se considera la construcción de una franja de retención de escorrentía por debajo de la sección de la cuneta con el fin de aumentar el volumen controlado en las cuencas en las que se tiene un mayor caudal excedente. El cálculo de esta sección se realiza acorde a lo especificado en la *Ecuación 29*, y se determina una sección de 60 cms. x 60 cms., la cual se compondrá por agregado con porosidad de 0.4. Por otro lado, dado que el coeficiente de permeabilidad es bajo, se deberá instalar un geotextil entre el agregado poroso y las paredes de la sección para evitar la generación de socavación en el suelo.

Se muestra a continuación la sección tipo para las cunetas verdes con la sección de retención por debajo de ella.

Figura 69. Sección tipo de cuneta y franja de retención inferior

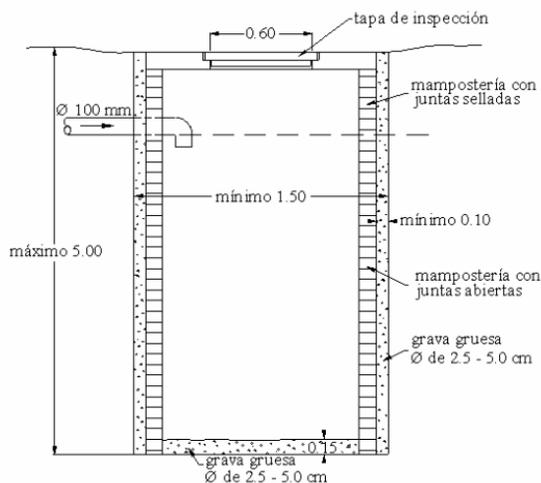


Fuente: Elaboración propia, con base en información proporcionada por COAMSS/OPAMSS

Pozo de Infiltración.

A partir de los volúmenes excedentes controlados con las cunetas verdes a lo largo de la microcuenca, se determinan los puntos para la construcción de pozos de infiltración en cada zona. Se verificará que las áreas identificadas sean las idóneas para se define, mediante la *Ecuación 6* el volumen a infiltrar en cada uno de ellos.

Figura 70. Sección tipo de Pozo de infiltración



Fuente: UNATSABAR, 2003. Especificaciones técnicas para el Diseño de Zanjas y Pozos de Infiltración

Funcionamiento de SUDS por Cuenca

Cuenca S-172, Colonia Médica.

El proceso de recolección de escorrentía en exceso para la cuenca se hará por medio de cunetas verdes del tipo C1 y C2, a lo largo de toda la cuenca, cada una con una sección de retención a lo largo del recorrido, la cual contará con material poroso que permitirá retener un volumen extra de escorrentía, con lo cual se disminuyen las velocidades con las que el agua fluye a lo largo de la cuenta. Estas cunetas, en combinación con el área de retención, tendrán la capacidad de disminuir el caudal excedente a fin de hacer llegar los valores de llenado de las tuberías y colectores principales entre 90% y 95% de su capacidad, y con esto disminuir la posibilidad de inundación en la zona de estudio para la condición de tormenta de diseño.

Además, se contempla la construcción de dos pozos, los cuales servirán como elementos de retención e infiltración para la cuenca. Funcionarán de tal modo que, al momento del rebalse, el agua pueda fluir por un nuevo sistema de cunetas hasta disponerse en el punto del vertedero de la cuenca.

Cuenca S-194, Boulevard Orden de Malta.

El proceso de recolección de escorrentía de exceso para la cuenca se hará por medio de cunetas verdes del tipo C2, en la zona más proclive a inundación de la cuenca. Estas cunetas, tendrán la capacidad de disminuir el caudal excedente a fin de hacer llegar los valores de llenado de las tuberías y colectores principales entre hasta 70% de su capacidad, y con esto disminuir la posibilidad de inundación en la zona de estudio.

Además, se contempla la construcción de un pozo, el cual servirá como elemento de retención e infiltración para la cuenca. Funcionará de tal modo que, al momento del rebalse, el agua pueda fluir por un nuevo sistema de cunetas hasta disponerse en un punto de la red hidráulica existente con capacidad suficiente para recibir la cantidad de escorrentía que llegue por medio de las cunetas verdes

Cuenca S-164, Boulevard de Los Próceres.

El proceso de recolección de escorrentía de exceso para la cuenca se hará por medio de cunetas verdes del tipo C2, a lo largo de toda la cuenca, cada una con una sección de retención a lo largo del recorrido, la cual contará con material poroso que permitirá retener un volumen extra de escorrentía, con lo cual se disminuyen las velocidades con las que el agua fluye a lo largo de la cuenta. Estas cunetas, en combinación con el área de retención, tendrán la capacidad de disminuir el caudal excedente a fin de hacer llegar los valores de llenado de las tuberías y colectores principales hasta un 70% de su capacidad, y con esto disminuir la posibilidad de inundación en la zona de estudio. Todo el flujo será dispuesto directamente por la red de cunetas hasta el punto del vertedero, permitiendo la disminución de la escorrentía retenida en el punto de inundación estudiado.

4.3 Matriz de Resultados con enfoque en la Reducción de Inundación.

Tabla 14. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-172.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud Canaletas	Vol. Retenido con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
0	1541.16					1541.16	19.20			
1	313.07					313.07	123.70			
2	348.01					348.01	73.58			
3	-241.17	86.82	C1	414.84	149.34	173.67	102.48	14.76	164.10	189%
4	-1244.50	448.02	C1	414.84	149.34	-414.82	90.35	13.01	162.35	36%
5	-2361.68	850.20	C2	648.00	233.28	-884.00	94.54	13.61	246.89	29%
6	-3871.26	1393.65	C2	561.24	202.05	-1832.34	180.16	25.94	227.99	16%
7	-4430.26	1594.89	C2	561.24	202.05	-1830.10	153.79	22.15	224.19	14%
8	-3364.66	1211.28	C2	561.24	202.05	-203.26	80.52	11.60	213.64	18%
9	3706.03					6867.43	31.91			
10	177.13					177.13	149.90			
11	-441.35	158.89	C2	528.53	190.27	87.18	150.23	21.63	211.90	133%
12	-1878.54	676.27	C2	528.53	190.27	-821.48	214.08	30.83	221.10	33%
13	-2766.77	996.04	C2	528.53	190.27	-1181.18	73.81	10.63	200.90	20%
14	-3171.23	1141.64	C2	528.53	190.27	-1057.11	129.09	18.59	208.86	18%
15	-149.51					-149.51	103.58			
16	785.44					785.44	9.33			
17	181.33					181.33	180.67			
18	-137.80					-137.80	92.24			
19	2197.87					2197.87	218.61			
20	25042.96					25042.96	136.64			

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Tabla 15. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-194.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta(litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
0	838.97							
1	74.74							
2	-142.98	51.47	C2	150.00	54.00	7.02	54.00	105%
3	-319.69	115.09	C2	150.00	54.00	-169.69	54.00	47%
4	-126.99	45.72	C2	150.00	54.00	23.01	54.00	118%
5	326.86					326.86		
6	-441.45					-441.45		
7	-326.51					-326.51		
8	249.99					249.99		
9	659.80					659.80		
10	-446.53					-446.53		
11	-267.92					-267.92		
12	375.39					375.39		
13	-847.67					-847.67		
14	-741.44					-741.44		
15	3490.92					3490.92		
16	3019.96					3019.96		
17	827.55					827.55		
18	-52.11	18.76	C2	150.00	54.00	97.89	54.00	288%
19	-70.19	25.27	C2	150.00	54.00	79.81	54.00	214%
20	607.02					607.02		
21	-32.19					-32.19		

Tabla 15. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-194.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta(litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
22	45.43					45.43		
23	54.06					54.06		
24	545.13					545.13		
25	17.97					17.97		
26	-150.84	54.30	C2	150.00	54.00	-0.84	54.00	99%
27	268.95					268.95		
28	50.02					50.02		
29	14.26					14.26		
30	-3.07					-3.07		
31	-131.13					-131.13		
32	24.90					24.90		
33	16.12					16.12		
34	-117.84					-117.84		
35	244.64					244.64		
36	936.40					936.40		
37	30.49					30.49		

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
0	949.94					949.94	85.05				
1	450.43					450.43	7.31				
2	259.10					259.10	6.71				
3	752.91					752.91	71.15				
4	1420.23					1420.23	5.54				
5	-326.67	117.60	C2	325.00	117.00	-1.67	41.56	41.56	5.98	122.98	1.05
6	201.03					201.03	73.82				
7	424.80					424.80	23.16				
8	1241.64					1241.64	17.46				
9	201.25					201.25	28.02				
10	-42.65					-42.65	103.92				
11	-126.15	45.42	C2	325.00	117.00	198.85	41.27	41.27	5.94	122.94	2.71
12	180.05					180.05	34.81				
13	737.85					737.85	9.21				
14	207.69					207.69	60.33				
15	519.40					519.40	37.98				
16	345.45					345.45	15.59				
17	497.49					497.49	29.92				
18	380.34					380.34	29.98				
19	2447.51					2447.51	2.42				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
20	833.92					833.92	54.87				
21	332.03					332.03	29.53				
22	1239.25					1239.25	33.21				
23	1372.87					1372.87	34.82				
24	667.36					667.36	13.75				
25	232.89					232.89	30.45				
26	-898.17	323.34	C2	325.00	117.00	-573.17	63.87	127.74	18.40	135.40	0.42
27	-843.76	303.75	C2	325.00	117.00	-518.76	36.65	73.30	10.56	127.56	0.42
28	-234.68	84.49	C2	325.00	117.00	90.32	39.99	39.99	5.76	122.76	1.45
29	-136.98	49.31	C2	325.00	117.00	188.02	39.93	39.93	5.75	122.75	2.49
30	-248.94	89.62	C2	325.00	117.00	76.06	46.94	46.94	6.76	123.76	1.38
31	-247.96	89.27	C2	325.00	117.00	77.04	50.26	50.26	7.24	124.24	1.39
32	-231.91	83.49	C2	325.00	117.00	93.09	33.70	33.70	4.85	121.85	1.46
33	-254.06	91.46	C2	325.00	117.00	70.94	22.10	22.10	3.18	120.18	1.31
34	-207.22	74.60	C2	325.00	117.00	117.78	24.12	24.12	3.47	120.47	1.61
35	-277.42	99.87	C2	325.00	117.00	47.58	25.66	25.66	3.69	120.69	1.21
36	-219.79	79.12	C2	325.00	117.00	105.22	46.76	46.76	6.73	123.73	1.56
37	-147.14	52.97	C2	325.00	117.00	177.87	52.29	52.29	7.53	124.53	2.35
38	-91.70	33.01	C2	325.00	117.00	233.30	15.40	15.40	2.22	119.22	3.61
39	-73.42	26.43	C2	325.00	117.00	251.58	9.748	9.75	1.40	118.40	4.48
40	-28.62	10.30	C2	325.00	117.00	296.38	74.831	74.83	10.78	127.78	12.40
41	-8.96	3.22	C2	325.00	117.00	316.04	20.084	20.08	2.89	119.89	37.19

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
42	-26.74	9.63	C2	325.00	117.00	298.26	40.022	40.02	5.76	122.76	12.75
43	69.24					69.24	44.635				
44	98.73					98.73	73.922				
45	-657.14	236.57	C2	325.00		-332.14	100.729	201.46	29.01	29.01	0.12
46	-209.77	75.52	C2	325.00		115.23	60.251	60.25	8.68	8.68	0.11
47	89.87					89.87	44.364				
48	15.56					15.56	48.142				
49	-674.97	242.99	C2	325.00		-349.97	100.009	200.02	28.80	28.80	0.12
50	-374.86	134.95	C2	325.00		-49.86	26.907	53.81	7.75	7.75	0.06
51	-660.87	237.91	C2	325.00		-335.87	44.644	89.29	12.86	12.86	0.05
52	-876.45	315.52	C2	325.00		-551.45	60.762	121.52	17.50	17.50	0.06
53	-797.13	286.97	C2	325.00		-472.13	54.288	108.58	15.63	15.63	0.05
54	-655.40	235.94	C2	325.00		-330.40	40.507	81.01	11.67	11.67	0.05
55	-175.76	63.27	C2	325.00		149.24	52.482	52.48	7.56	7.56	0.12
56	5598.88					5598.88	56.094				
57	722.47					722.47	28.633				
58	220.52					220.52	29.487				
59	2661.59					2661.59	63.448				
60	732.37					732.37	25.046				
61	351.79					351.79	44.974				
62	700.47					700.47	21.198				
63	236.09					236.09	56.281				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
64	68.71					68.71	19.630				
65	528.97					528.97	17.314				
66	13.88					13.88	31.686				
67	-482.37					-482.37	63.750				
68	-291.73					-291.73	50.802				
69	196.37					196.37	47.651				
70	213.10					213.10	40.669				
71	27.12					27.12	44.838				
72	629.99					629.99	39.106				
73	-215.51					-215.51	22.059				
74	305.23					305.23	85.137				
75	127.34					127.34	54.006				
76	360.34					360.34	60.367				
77	-21.19					-21.19	88.792				
78	32370.80					32370.80	7.930				
79	3751.06					3751.06	2.842				
80	6364.39					6364.39	39.303				
81	1362.54					1362.54	100.540				
82	5485.01					5485.01	78.246				
83	1956.92					1956.92	42.482				
84	337.48					337.48	34.776				
85	217.14					217.14	35.112				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
86	565.54					565.54	30.578				
87	465.24					465.24	60.968				
88	1652.70					1652.70	27.964				
89	-279.87					-279.87	79.556				
90	-61.80					-61.80	87.091				
91	-51.40					-51.40	61.331				
92	-73.21					-73.21	21.564				
93	-224.61					-224.61	98.813				
94	-281.01					-281.01	71.326				
95	-112.68					-112.68	54.130				
96	-133.71					-133.71	69.769				
97	142.07					142.07	49.829				
98	353.09					353.09	50.158				
99	280.19					280.19	48.143				
100	266.39					266.39	40.622				
101	135.49					135.49	32.803				
102	238.79					238.79	32.438				
103	248.10					248.10	39.383				
104	702.85					702.85	16.472				
105	376.49					376.49	28.247				
106	438.72					438.72	20.020				
107	960.67					960.67	21.698				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
108	762.81					762.81	37.102				
109	1789.75					1789.75	61.087				
110	1874.66					1874.66	48.003				
111	1601.51					1601.51	49.971				
112	370.59					370.59	43.013				
113	373.59					373.59	49.882				
114	296.38					296.38	41.157				
115	325.17					325.17	49.962				
116	3569.27					3569.27	39.965				
117	3871.44					3871.44	36.011				
118	1586.65					1586.65	49.731				
119	7629.35					7629.35	28.395				
120	5291.12					5291.12	39.289				
121	6225.14					6225.14	51.509				
122	7614.44					7614.44	37.064				
123	1341.29					1341.29	8.903				
124	81.67					81.67	42.511				
125	2096.92					2096.92	58.264				
126	9860.00					9860.00	39.619				
127	7907.74					7907.74	39.969				
128	8648.30					8648.30	39.921				
129	7741.59					7741.59	35.074				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
130	-176.69					-176.69	43.682				
131	-70.11					-70.11	69.728				
132	250.68					250.68	60.214				
133	84.80					84.80	29.310				
134	-138.45					-138.45	20.779				
135	-205.74					-205.74	49.848				
136	-180.79					-180.79	51.171				
137	1379.07					1379.07	33.552				
138	190.83					190.83	33.181				
139	336.76					336.76	75.455				
140	347.16					347.16	71.998				
141	492.95					492.95	3.467				
142	307.80					307.80	39.048				
143	181.10					181.10	34.768				
144	82.62					82.62	34.830				
145	5850.09					5850.09	48.288				
146	181.74					181.74	35.228				
147	8059.56					8059.56	31.490				
148	-1423.24					-1423.24	50.440				
149	-1147.34					-1147.34	38.786				
150	608.32					608.32	80.153				
151	494.11					494.11	39.409				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
152	751.17					751.17	26.896				
153	435.72					435.72	26.551				
154	-381.15					-381.15	25.338				
155	-32.32					-32.32	34.407				
156	-202.87					-202.87	40.501				
157	110.40					110.40	23.678				
158	20.29					20.29	35.019				
159	73.96					73.96	34.979				
160	54.77					54.77	29.258				
161	3244.21					3244.21	91.587				
162	1061.00					1061.00	59.072				
163	839.46					839.46	18.507				
164	287.58					287.58	29.288				
165	350.70					350.70	22.162				
166	3428.32					3428.32	46.253				
167	1083.96					1083.96	49.167				
168	4668.49					4668.49	9.926				
169	1109.69					1109.69	24.402				
170	3849.28					3849.28	18.822				
171	423.67					423.67	14.304				
172	856.68					856.68	7.250				
173	719.42					719.42	29.182				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
174	1072.17					1072.17	28.137				
175	15.23					15.23	38.294				
176	112.38					112.38	20.032				
177	259.13					259.13	39.082				
178	2615.18					2615.18	16.218				
179	44.41					44.41	75.126				
180	-209.84					-209.84	49.835				
181	121.39					121.39	65.321				
182	89.42					89.42	40.307				
183	176.94					176.94	33.099				
184	158.30					158.30	45.517				
185	4698.34					4698.34	41.745				
186	87.70					87.70	12.881				
187	529.82					529.82	5.505				
188	-163.35					-163.35	9.531				
189	469.09					469.09	30.063				
190	526.25					526.25	38.233				
191	72.73					72.73	31.943				
192	12.36					12.36	26.577				
193	-188.59					-188.59	30.118				
194	4799.57					4799.57	54.074				
195	4413.48					4413.48	33.140				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
196	1214.62					1214.62	94.737				
197	1974.19					1974.19	22.655				
198	-164.47					-164.47	37.708				
199	208.61					208.61	10.554				
200	376.47					376.47	30.100				
201	4479.40					4479.40	13.216				
202	5093.72					5093.72	20.835				
203	2745.30					2745.30	10.054				
204	119.28					119.28	75.438				
205	371.69					371.69	16.177				
206	1557.08					1557.08	28.418				
207	589.94					589.94	25.343				
208	1729.16					1729.16	19.639				
209	1136.47					1136.47	25.175				
210	1488.13					1488.13	23.548				
211	-310.32					-310.32	25.346				
212	76.89					76.89	25.074				
213	-270.73					-270.73	42.481				
214	-923.93					-923.93	59.268				
215	2171.49					2171.49	55.125				
216	13190.26					13190.26	14.267				
217	3940.38					3940.38	39.647				

Tabla 16. Resumen de caudales y volúmenes intervenidos para cuenca S-164.

ID COLECTOR	Qrest - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Tipo de Canaleta	Q Disminuido con canaleta (litros/seg)	Volumen disminuido con canaleta (m3)	Qrest intervenido (litros/s)	Longitud	Longitud Canaletas	Volumen retenedico con sección extra (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
218	909.89					909.89	62.998				
219	980.73					980.73	22.285				
220	749.12					749.12	22.138				
221	1388.96					1388.96	25.667				

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Las columnas y filas sin propuestas no se priorizan por no presentar colapso o no tener áreas de posible intervención.

4.4 Comparativa de volúmenes controlados respecto de volúmenes iniciales.

A partir de los datos obtenidos se presentan para cada cuenca los tramos intervenidos y los porcentajes a controlar. Es importante tomar en cuenta que los valores calculados representan el porcentaje del volumen que excede la condición ideal del 70% de la capacidad hidráulica de la tubería.

Tabla 17. Comparativa de volúmenes iniciales y volúmenes de control para cuenca S172.

ID COLECTOR	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% DE C.H.	EVALUACIÓN	Q _{rest} - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
3	2320.3	0.72	71.63	NORMAL	-241.17	86.82	164.1	189%
4	2803.82	0.95	94.68	NORMAL	-1244.5	448.02	162.35	36%
5	3313.9	1.27	127.01	COLAPSO	-2361.68	850.2	246.89	29%
6	4106.48	1.79	179.44	COLAPSO	-3871.26	1393.65	227.99	16%
7	4778.91	1.75	174.53	COLAPSO	-4430.26	1594.89	224.19	14%
8	5099.98	1.19	119.01	COLAPSO	-3364.66	1211.28	213.64	18%
11	1200.34	0.88	88.32	NORMAL	-441.35	158.89	211.9	133%
12	2307.52	1.46	145.79	COLAPSO	-1878.54	676.27	221.1	33%
13	2623.4	2.25	224.54	COLAPSO	-2766.77	996.04	200.9	20%
14	2972.3	2.31	230.91	COLAPSO	-3171.23	1141.64	208.86	18%

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Tabla 18. Comparativa de volúmenes iniciales y volúmenes controlados para cuenca S194.

ID COLECTOR	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% DE C.H.	EVALUACIÓN	Q _{rest} - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
2	667.73	1.27	127.25	COLAPSO	-142.98	51.47	54	105%
3	1010.86	1.46	146.25	COLAPSO	-319.69	115.09	54	47%
4	379.37	1.5	150.32	COLAPSO	-126.99	45.72	54	118%
18	162.23	1.47	147.32	COLAPSO	-52.11	18.76	54	288%
19	202.96	1.53	152.87	COLAPSO	-70.19	25.27	54	214%
26	459.97	1.49	148.79	COLAPSO	-150.84	54.3	54	99%

Tabla 19. Comparativa de volúmenes iniciales y volúmenes controlados para cuenca S164.

ID COLECTOR	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% de C.H.	EVALUACION	Q _{rest} - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
5	951.01	1.52	152.32	COLAPSO	-326.67	117.6	122.98	1.05
11	361.36	1.54	153.63	COLAPSO	-126.15	45.42	122.94	2.71
26	3229.31	1.39	138.53	COLAPSO	-898.17	323.34	135.4	0.42
27	3356	1.34	133.59	COLAPSO	-843.76	303.75	127.56	0.42
28	677.3	1.53	153.02	COLAPSO	-234.68	84.49	122.76	1.45
29	673.03	1.26	125.55	COLAPSO	-136.98	49.31	122.75	2.49
30	713.12	1.54	153.63	COLAPSO	-248.94	89.62	123.76	1.38
31	716.76	1.53	152.89	COLAPSO	-247.96	89.27	124.24	1.39
32	712.98	1.48	148.21	COLAPSO	-231.91	83.49	121.85	1.46
33	784.34	1.48	147.91	COLAPSO	-254.06	91.46	120.18	1.31
34	857.65	1.32	131.86	COLAPSO	-207.22	74.6	120.47	1.61
35	935.84	1.42	142.13	COLAPSO	-277.42	99.87	120.69	1.21
36	641.08	1.52	152.17	COLAPSO	-219.79	79.12	123.73	1.56
37	467.14	1.46	145.98	COLAPSO	-147.14	52.97	124.53	2.35
38	283.28	1.48	147.86	COLAPSO	-91.7	33.01	119.22	3.61
39	219.03	1.5	150.43	COLAPSO	-73.42	26.43	118.4	4.48
40	332.62	1.09	109.41	COLAPSO	-28.62	10.3	127.78	12.4
41	818.73	1.01	101.11	COLAPSO	-8.96	3.22	119.89	37.19
42	75.79	1.55	154.52	COLAPSO	-26.74	9.63	122.76	12.75
45	1940.53	1.51	151.2	COLAPSO	-657.14	236.57	29.01	0.12
46	1309.68	1.19	119.07	COLAPSO	-209.77	75.52	8.68	0.11
49	2048.5	1.49	149.14	COLAPSO	-674.97	242.99	28.8	0.12
50	3847.24	1.11	110.8	COLAPSO	-374.86	134.95	7.75	0.06
51	3771.5	1.21	121.25	COLAPSO	-660.87	237.91	12.86	0.05
52	3662.53	1.31	131.46	COLAPSO	-876.45	315.52	17.5	0.06
53	3551.63	1.29	128.94	COLAPSO	-797.13	286.97	15.63	0.05

Tabla 19. Comparativa de volúmenes iniciales y volúmenes controlados para cuenca S164.

ID COLECTOR	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% de C.H.	EVALUACION	Q _{rest} - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Volumen controlado (m3)	% de volumen de control
54	3449.36	1.23	123.46	COLAPSO	-655.4	235.94	11.67	0.05
55	511.49	1.52	152.35	COLAPSO	-175.76	63.27	7.56	0.12

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

Tabla 20. Resultados del porcentaje de Carga Hidráulica en cada colector en la cuenca S194.

ID COLECTOR	Q _{LL70%} (litros/s)	*Q _{acum} (litros/s)	Q _{hidr} /Q _{LL70%}	% DE C.H.	EVALUACIÓN	Q _{rest} - inicial (litros/s)	Volumen inicial (m3)	Volumen controlado (m3)
2	524.75	667.73	1.27	127.25	COLAPSO	-142.98	51.47	54
3	691.17	1010.86	1.46	146.25	COLAPSO	-319.69	115.09	54
4	252.38	379.37	1.5	150.32	COLAPSO	-126.99	45.72	54
18	110.12	162.23	1.47	147.32	COLAPSO	-52.11	18.76	54
19	132.77	202.96	1.53	152.87	COLAPSO	-70.19	25.27	54
26	309.13	459.97	1.49	148.79	COLAPSO	-150.84	54.3	54

4.5 Análisis de Costos de SUDS Propuestos.

Para este análisis se presentan los costos directos que supondría la aplicación de los SUDS propuestos en los sectores de estudio y la valoración económica de los beneficios que conlleva aplicarlos. Es importante mencionar que se generaron costos unitarios en base a costos de mano de obra de referencia del Laudo Arbitral del SUCTS y costos de materiales vigentes a la fecha de realización de este trabajo.

4.5.1 Costos Directos de Técnicas SUDS propuestas.

- Costos directos relacionados a la construcción de cuneta verde propuesta en Cuenca S-172, Colonia Médica.

Cuneta Verde tipo C1

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
	SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE ESCORRENTÍA.				
1.00	CUNETA VERDE CON MATERIAL PETREO 60X110cm				
1.01	Demolición de cordón-cuneta con martillo demoledor.	192.83	ml	\$ 3.20	US\$ 617.06
1.02	Excavación de zanja ancho de 0.60m y profundidad de 2m con retro excavadora.	192.83	ml	\$ 9.72	US\$ 1 874.31
1.03	Nivelación de superficie para generación de pendiente adecuada.	192.83	ml	\$ 0.35	US\$ 67.48
1.04	Suministro y aplicación de impermeabilizante con membrana asfáltica y geotextil no tejido drenante NT 1600	192.83	ml	\$ 16.50	US\$ 3 181.70
1.05	Suministro y colocación de grava	127.27	m3	\$ 41.92	US\$ 5 334.89
1.06	Suministro e instalación de rejilla metálica.	192.83	ml	\$ 25.00	US\$ 4 820.75
1.07	Reconstrucción de cordón-Cuneta.	200.00	ml	\$ 27.40	US\$ 5 480.00
C.D. TOTAL S/IVA					US\$ 21 376.18
CANT. TOTAL ml					200.00
C.D.U. /ml					US\$ 106.88

Cuneta Verde tipo C2

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
	SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE ESCORRENTÍA.				
1.00	CUNETA VERDE CON MATERIAL PETREO 60X100cm				
1.01	Demolición de cordón-cuneta con martillo demoledor.	1076.22	ml	\$ 3.20	US\$ 3 443.90

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
	SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE ESCORRENTÍA.				
1.00	CUNETA VERDE CON MATERIAL PETREO 60X100cm				
1.02	Excavación de zanja ancho de 0.60m y profundidad de 2m con retro excavadora.	1076.22	ml	\$ 9.72	US\$ 10 460.86
1.03	Nivelación de superficie para generación de pendiente adecuada.	1076.22	ml	\$ 0.35	US\$ 376.63
1.04	Suministro y aplicación de impermeabilizante con membrana asfáltica y geotextil no tejido drenante NT 1600	1076.22	ml	\$ 16.50	US\$ 17 757.63
1.05	Suministro y colocación de grava	645.73	m3	\$ 41.92	US\$ 27 068.21
1.06	Suministro e instalación de rejilla metálica.	1076.22	ml	\$ 25.00	US\$ 26 905.50
1.07	Reconstrucción de cordon-Cuneta.	1076.22	ml	\$ 27.40	US\$ 29 488.43
C.D. TOTAL S/IVA					US\$115 501.16
CANT. TOTAL ml					1076.22
C.D.U. /ml					US\$ 107.32

- Costos directos relacionados a la construcción de pozos de infiltración propuesto en Cuenca S-172, Colonia Médica.

Pozo P1.

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
	POZO DE INFILTRACIÓN.				
1.00	POZO DE INFILTRACIÓN. D=3.00m h=5.00m				
1.01	Excavación de pozo D=3.00m con retro excavadora.	35.34	m3	\$ 8.10	US\$ 286.28
1.02	Suministro y colocación matriz de grava.	35.34	m3	\$ 41.92	US\$ 1 481.58
1.03	Suministro y colocación de geotextil no tejido drenante.	47.12	m2	\$ 5.85	US\$ 275.67
1.04	Suministro e instalación de tubo de PVC 6" para inspección de pozo	3.00	ml	\$ 24.45	US\$ 73.36

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
	POZO DE INFILTRACIÓN.				
1.00	POZO DE INFILTRACIÓN. D=3.00m h=5.00m				
1.05	Instalación de tubo de PVC 6" para conexión de cámara de sedimentación con pozo.	1.00	ml	\$ 24.45	US\$ 24.45
1.06	Instalación de tubo de PVC 2" para respiradero del pozo.	1.00	ml	\$ 24.45	US\$ 24.45
1.07	Construcción de cámara de sedimentación, de concreto reforzado con varilla #4 de 1x1x1m.	1.00	m3	\$ 300.00	US\$ 300.00
1.08	Suministro e instalación de cama de arena en fondo de pozo, capa de 50 cm.	3.53	m3	\$ 28.42	US\$ 100.46
C.D. SIN IVA					US\$ 2 566.25
CANT. TOTAL m3					35.34
C.D.U. /m3					US\$ 72.61

- Costos directos relacionados a la construcción de cuneta verde propuesta en Cuenca S-194, Boulevard Orden de Malta.

Cuneta Verde tipo C1

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
	SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE ESCORRENTÍA.				
1.00	CUNETAS VERDES CON MATERIAL PETREO 60X40cm				
1.01	Demolición de cordón-cuneta con martillo demoledor.	887.58	ml	\$ 3.20	US\$ 2 840.26
1.02	Excavación de zanja ancho de 0.60m y profundidad de 2m con retro excavadora.	887.58	ml	\$ 9.72	US\$ 8 627.28
1.03	Nivelación de superficie para generación de pendiente adecuada.	887.58	ml	\$ 0.35	US\$ 310.62

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
	SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE ESCORRENTÍA.				
1.00	CUNETA VERDE CON MATERIAL PETREO 60X40cm				
1.04	Suministro y aplicación de impermeabilizante con membrana asfáltica y geotextil no tejido drenante NT 1600	887.58	ml	\$ 16.50	US\$ 14 645.07
1.05	Suministro y colocación de grava	213.02	m3	\$ 41.92	US\$ 8 929.48
1.06	Suministro e instalación de rejilla metálica.	887.58	ml	\$ 25.00	US\$ 22 189.50
1.07	Reconstrucción de cordón-Cuneta.	887.58	ml	\$ 27.40	US\$ 24 319.69
C.D. TOTAL S/IVA					US\$ 81 861.89
CANT. TOTAL ml					887.58
C.D.U./ml					US\$ 92.23

- Costos directos relacionados a la construcción de pozos de infiltración propuesto en S-194, Boulevard Orden de Malta.

Pozo P2

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
	POZO DE INFILTRACIÓN.				
1.00	POZO DE INFILTRACIÓN. D=4.50m h=5.00m				
1.01	Excavación de pozo D=3.00m con retro excavadora.	79.52	m3	\$ 8.10	US\$ 644.12
1.02	Suministro y colocación matriz de grava.	79.52	m3	\$ 41.92	US\$ 3 333.54
1.03	Suministro y colocación de geotextil no tejido drenante.	70.69	m2	\$ 5.85	US\$ 413.51
1.04	Suministro e instalación de tubo de PVC 6" para inspección de pozo	3.00	ml	\$ 24.45	US\$ 73.36
1.05	Instalación de tubo de PVC 6" para conexión de cámara de sedimentación con pozo.	1.00	ml	\$ 24.45	US\$ 24.45
1.06	Instalación de tubo de PVC 2" para respiradero del pozo.	1.00	ml	\$ 24.45	US\$ 24.45

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
POZO DE INFILTRACIÓN.					
1.00	POZO DE INFILTRACIÓN. D=4.50m h=5.00m				
1.07	Construcción de cámara de sedimentación, de concreto reforzado con varilla #4 de 1x1x1m.	1.00	m3	\$ 300.00	US\$ 300.00
1.08	Suministro e instalación de cama de arena en fondo de pozo, capa de 50 cm.	7.95	m3	\$ 28.42	US\$ 226.04
C.D. SIN IVA					US\$ 5 039.48
CANT. TOTAL m3					21.21
C.D.U. /m3					US\$ 237.65

- Costos directos relacionados a la construcción de cuneta verde propuesta en Cuenca S-164, Boulevard de Los Próceres.
Cuneta Verde tipo C1

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	UND.	CU	SUB TOTAL
SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE ESCORRENTÍA.					
1.00	CUNETAS VERDES CON MATERIAL PETREO 60X110cm				
1.01	Demolición de cordón-cuneta con martillo demolidor.	1794.14	ml	\$ 3.20	US\$ 5 741.25
1.02	Excavación de zanja ancho de 0.60m y profundidad de 2m con retro excavadora.	1794.14	ml	\$ 9.72	US\$ 17 439.04
1.03	Nivelación de superficie para generación de pendiente adecuada.	1794.14	ml	\$ 0.35	US\$ 627.87
1.04	Suministro y aplicación de impermeabilizante con membrana asfáltica y geotextil no tejido drenante NT 1600	1794.14	ml	\$ 16.50	US\$ 29 603.31
1.05	Suministro y colocación de grava	1184.13	m3	\$ 41.92	US\$ 49 637.22
1.06	Suministro e instalación de rejilla metálica.	1794.14	ml	\$ 25.00	US\$ 44 853.50
1.07	Reconstrucción de cordón-Cuneta.	1794.14	ml	\$ 27.40	US\$ 49 159.44
C.D. TOTAL S/IVA					US\$197 061.63
CANT. TOTAL ml					1794.14
C.D.U. /ml					US\$ 109.84

4.6 Matriz de Triple Enfoque Económico, Ambiental (Hidráulico), y Social.

Tabla 21. Comparativa de volúmenes iniciales y volúmenes controlados para cuenca S164.

Cuenca	Principales Impactos y Beneficios		
	ECONÓMICO	SOCIAL	AMBIENTAL
S-172, Colonia Médica	<p>Economía: Acorde la cantidad de escorrentía y a los valores excedentes de la red de drenajes, la aplicación de SUDS representa una alternativa viable dada la complejidad y el costo económico que representaría el cambio de los drenajes actuales para las capacidades reales.</p>	<p>Movilidad: A pesar de que dentro del área de la microcuenca la mayor parte de las calles son secundarias, estas cumplen una función de alternabilidad en las rutas de tránsito, máxime en el horario pico de tráfico de la ciudad de San Salvador, por lo que, al disminuir el riesgo de inundación, la movilidad en época lluviosa, la cual se torna más difícil, dadas las condiciones de las zonas aledañas, se ve afectada de manera positiva al generar condiciones para el flujo vehicular.</p>	<p>Cantidad y Calidad del Agua: La reducción de la escorrentía y el apoyo mediante las técnicas SUDS al ciclo del agua es de vital importancia en una cuenca que se encuentra en gran parte impermeabilizada, y que por lo mismo está expuesta al poco control de la escorrentía pluvial.</p>
	<p>Actividad Comercial: Por otro lado, el impacto en la actividad comercial del sector se vería beneficiado, ya que se tendría una mayor seguridad para el consumidor o cliente de los establecimientos de toda la cuenca. Siendo esto, una mejora en la dinámica económica del sector.</p>	<p>Salud, Educación y Justicia: Las principales actividades sociales que se desarrollan en el sector rondan en torno a la gran cantidad de clínicas médicas de diversa índole, las instituciones educativas superiores cercanas y el centro judicial radicado en la zona, por lo que, de manera directa se disminuye el impacto que la posibilidad de inundaciones pueda causar en la cotidianidad de la población que hace uso de la vía pública, minimizando los riesgos para la vida y de desarrollo productivo de las personas.</p>	<p>Control de Desechos: Tomando en cuenta que, en general, el gran San Salvador tiene un problema con el tratamiento que se le da a la basura, por lo cual se tiene una gran cantidad de esta en las calles, la aplicación de cunetas verdes con agregados gruesos representa una especie de barrera o trampa para que las grandes partículas de basura puedan llegar al cuerpo receptor. Esto, partiendo del</p>

Tabla 21. Comparativa de volúmenes iniciales y volúmenes controlados para cuenca S164.

Cuenca	Principales Impactos y Beneficios		
	ECONÓMICO	SOCIAL	AMBIENTAL
			supuesto que los elementos de los SUDS tendrán un mantenimiento periódico, a fin de remover esa cantidad de basura.
S-194, Boulevard Orden de Malta	<p>Intervención parcial de la morfología de la cuenca. Dado que los valores excedentes de escorrentía en el sector se pueden reducir de manera eficiente mediante la implementación de técnicas SUDS, se vuelve una opción económicamente viable, dado que no representa una intervención completa del drenaje de toda la cuenca, sino más bien la aplicación y construcción de drenajes sostenibles en el punto clave de inundación a la altura del Boulevard principal.</p>	<p>Tránsito y dinámica Social. Debido a que en el sector se encuentra la Embajada de los Estados Unidos, la implementación de las técnicas SUDS para la disminución de la probabilidad de inundaciones urbanas traería consigo una mejora en la logística de la dinámica social que incluye todo el tránsito y movilización de personas por cuestiones migratorias en la zona.</p>	<p>Control de la escorrentía superficial. La reducción de la escorrentía y el apoyo mediante las técnicas SUDS al ciclo del agua es de vital importancia en una cuenca que se encuentra cercana a la cordillera y que, debido a su topografía tiende a concentrar corrientes de agua con grandes velocidades que se concentran en la zona del boulevard, por lo que se vuelve importante la contribución del drenaje sostenible en cuanto a la disminución de la velocidad de la escorrentía en la cuenca.</p>

Tabla 21. Comparativa de volúmenes iniciales y volúmenes controlados para cuenca S164.

Cuenca	Principales Impactos y Beneficios		
	ECONÓMICO	SOCIAL	AMBIENTAL
S - 164, Boulevard de Los Próceres	<p>Menor impacto en intervención de la vía pública. En tema de costos, la intervención total del drenaje existente representaría una dificultad mayor debido a que se tendría que operar en áreas de gran flujo vehicular. Con la aplicación de SUDS se disminuye el área de impacto de las obras, siendo estas mayormente a los extremos de calzadas, facilitando la logística constructiva y disminuyendo costos indirectos de las obras.</p> <p>Comercial y económicamente, la aplicación de las técnicas SUDS en el sector de gran beneficio en el sector, ya que, al disminuir probabilidades de inundación, dado que es una vía de principal acceso y de utilización de una gran masa vehicular, representaría una mejora en la logística y en la dinámica económica de los establecimientos y usuarios de todas las entidades comerciales del sector.</p>	<p>Movilidad y Tránsito. En temas de movilidad la cuenca forma parte de una vía principal para el flujo vehicular, por lo que la disminución de la probabilidad de inundaciones en el sector impactaría en gran escala a un gran sector de la población de hace uso de la vía tanto en transporte público, vehículo propio o de forma peatonal.</p>	<p>Control de velocidad y escorrentía. Al igual que en las otras cuencas debido a que la topografía tiende a concentrar corrientes de agua con grandes velocidades se vuelve importante la contribución del drenaje sostenible en cuanto a la disminución de la velocidad de la escorrentía en la cuenca. Además la aplicación de cunetas verdes con agregados gruesos representa una especie de barrera o trampa para que las grandes partículas de basura puedan llegar al cuerpo receptor.</p>

Fuente: Elaboración propia del grupo de Tesis.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. INTRODUCCIÓN

Toda la información recolectada para ser utilizada en este Trabajo de Graduación se ve reflejada en la implementación de las Cadenas de drenaje que ayudan al control de la escorrentía en las zonas propensas a inundaciones urbanas, las cuales son puntos críticos que pueden afectar en el corto y mediano plazo el desarrollo de las actividades sociales, económicas y ambientales de algunos sectores vulnerables del AMSS.

Basados en los resultados obtenidos mediante el diseño conceptual para cada una de las cuencas de estudio, se presenta en este capítulo algunas Conclusiones estructuradas a partir del análisis de datos y de los objetivos planteados al inicio del trabajo de graduación.

Los resultados reflejan los impactos en la red drenajes existentes, así como los costos y las ventajas que la aplicación de los SUDS, representarían en las zonas estudiadas y analizadas.

Además, se exponen las Recomendaciones pertinentes identificadas a partir de las deficiencias y problemas encontrados para la aplicabilidad de las técnicas SUDS en la zona del AMSS, de las cuales es importante tomar nota, ya que son puntos para tomar en cuenta para la viabilidad de cualquier proyecto, que pretenda su ejecución.

5.2. CONCLUSIONES.

- La aplicación de las metodologías SUDS se vuelve un elemento primordial de cara a las circunstancias actuales de las redes de drenaje existente, las cuales, al tener un periodo de uso de más de 50 años, se encuentran superadas en cuanto a la capacidad de recibir los caudales generados por la constante impermeabilización de suelos en el área metropolitana, como puede observarse en la matriz de selección de los puntos de estudio del Capítulo III de este Trabajo de graduación, en la que el criterio de impermeabilización para cada uno de los puntos seleccionados tiene un porcentaje por encima del 70%, estos datos, basados en el Anexo 33 del Geoportal de COAMSS-OPAMSS .
- Dadas las condiciones de impermeabilización que existen en el AMSS y a los Coeficientes de permeabilidad en las zonas; además, del área de acción para el ejecutante del proyecto, es importante el análisis de la conveniencia de cada tipo de SUDS, ya que no todos son aptos para aplicarse bajo cualquier condición del espacio. La elección de éste, deberá atender, además, los diferentes factores que generan la vulnerabilidad del punto de estudio, tales como los caudales pico, el tipo de uso de suelo incluso enfoque de paisajismo; así como, la topografía del lugar y el impacto en las actividades económicas y sociales del sector, entre otros.
- La selección de los puntos específicos de estudio y análisis se determinaron dentro de tres cuencas del AMSS. La selección fue basada en la información recabada mediante diferentes fuentes, con las cuales se alimentó una matriz de riesgos de inundación, que ayudó a determinar los puntos idóneos para la aplicación de un modelo de Drenaje sostenible, llegándose finalmente a tomar las cuencas:

- S172 – Colonia Médica.
 - S164 – Boulevard de Los Próceres.
 - S194 – Boulevard Orden de Malta.
-
- Para cada uno de los sitios se identificaron puntos específicos de inundación para aplicar las técnicas SUDS, con el fin de disminuir el riesgo de colapso en los puntos analizados.
 - Para cada una de las tres cuencas elegidas, se realizó un análisis hidrológico mediante la aplicación del Método racional acorde a la normativa vigente, en el que se determinó una intensidad para un tiempo de concentración de 6 min. La intensidad para el análisis se determinó utilizando las curvas IDF de la estación Pluviométrica UES, para un periodo de retorno de 25 años.
 - En la revisión hidráulica de la red existente, se determinó que las tuberías existentes están colapsadas en cuanto a su capacidad, estando en su mayoría, por encima del 70%, que es el caudal óptimo de trabajo.
 - Con todo el análisis y propuesta realizada, se logró que cada una de las cuencas seleccionadas tuviera una disminución “teórica” en los valores críticos identificados inicialmente, creando un alivio general de la red existente mediante la implementación de las técnicas de Drenaje sostenible, lo que representa un impacto positivo en los aspectos económico, social y ambiental, como puede justificarse en la Matriz de triple enfoque presentada en el capítulo IV de esta investigación, en la que se describe de manera precisa los tópicos, en los que el desarrollo de las actividades cotidianas se verían beneficiadas.
 - Por otro lado, es importante recalcar que los puntos de estudio son parte de un listado largo de sectores que se ven afectados por los altos niveles de impermeabilización del Área Metropolitana de San Salvador, por lo que se le

debe prestar especial atención a las zonas con un alto porcentaje de área impermeabilizada, ya que, aunque el proceso tenga un costo económico mayor, deberán ser estos los puntos críticos a tratar inicialmente con la aplicación de las nuevas técnicas de Drenaje sostenible, y así tener un mayor impacto en el alivio de la red de drenajes existentes y una disminución de la vulnerabilidad de algunos sectores de la ciudad, relacionadas con las inundaciones urbanas.

CUENCA S172 – COLONIA MÉDICA

- La cuenca S172 se encontró colapsada en varios tramos de su red, encontrándose en el análisis, sectores que estaban superados en su capacidad a más del 300%.
- Teniendo como base los datos del análisis hidráulico, se determinó mediante el diseño conceptual, la aplicación conforme metodología SUDS, de una red de cunetas verdes y pozos de infiltración que ayudarán a captar parte del excedente del agua lluvia de la red existente. Este excedente podrá ser infiltrado en los pozos, y/o transportado mediante las cunetas verdes hacia el vertedero.
- Se diseñaron dos tipos secciones para cuneta verde en esta cuenca, dependiendo de la capacidad hidráulica requerida: la primera de 60 x 100 cm., y la segunda de 60 x 110 cm.; además, cada tipo de cuneta cuenta con una sección inferior de retención, la cual está compuesta por material poroso (de Coeficiente = 0.4), lo cual permite la disminución del tiempo de llenado del pozo de infiltración.
- Por otra parte, se diseñó un tipo de Pozo de infiltración con un diámetro de 3.00 metros y una profundidad de 5.00 metros, el cual está diseñado para retener e infiltrar 9 metros cúbicos de su volumen total retenido (35 m³), en un periodo de 24 horas.
- Acorde al cálculo realizado, se tiene que con la aplicación de las técnicas SUDS en la zona, la red hidráulica existente tendría una disminución los

volúmenes de excedencia considerables, en algunos casos de más del 100% del excedente inicial. Todos los cálculos fueron realizados para que las tuberías no trabajaran a más del 90% de su capacidad. A pesar de que este valor no representa un nivel óptimo en el funcionamiento de la red de drenajes, si es una mejora a las condiciones hidráulicas, tomando en cuenta que los caudales actuales exceden hasta un 300% de su capacidad.

- En cuanto a las implicaciones económicas, la aplicación de las técnicas SUDS representan, se tiene que los dos tipos de Cunetas tendrían un costo de alrededor de \$107.00 cada metro lineal, y los Pozos de infiltración representaría un costo de \$72.61 cada metro cúbico. Una de las ventajas es que estos costos consideran un proceso constructivo que no tendría impacto sobre el tránsito tanto de vehículos como de personas, ya que no implicaría la intervención en las tuberías existentes que van a una profundidad mayor y tienen grandes dimensiones.
- Ambientalmente, al ser la cuenca de la colonia Médica, un territorio muy impermeabilizado, la aplicación de las técnicas SUDS, actuarían como un reproductor del ciclo del agua, al generar un transporte directo hacia el vertedero, punto en el que se deposita en un cauce natural, y también al infiltrar, en menor medida, acorde a las capacidades del suelo existente.

CUENCA S164 – SECTOR BOULEVARD DE LOS PRÓCERES

- La cuenca S164 se encontró colapsada en varios tramos de su red, determinándose en el análisis, sectores que estaban superados en su capacidad hasta en un 153%.
- También, teniéndose como base los datos del análisis hidráulico, se determinó mediante el diseño conceptual, la aplicación conforme metodología SUDS, de una red de cunetas verdes que ayudarán a captar parte del excedente del flujo de la red existente. Este excedente podrá ser transportado mediante las cunetas directamente hacia el vertedero, sin

necesidad de pasar por la red de drenajes existente, lo cual permitirá aliviar el excedente del flujo actual.

- Se diseñó en esta cuenca, un tipo de sección de cuneta verde de 60 x 100 cms.; además, cada tipo de cuneta contará con una sección inferior de retención, la cual está compuesta por material poroso (Coeficiente = 0.4), lo que permite la disminución del volumen de captación de la cuneta.
- Acorde al cálculo realizado, se tiene que, con la aplicación de las técnicas SUDS en la zona, la red hidráulica existente tendría una disminución de los volúmenes de excedencia de manera considerable, en algunos casos de más de 3 veces del excedente inicial. Es importante mencionar que, todos los cálculos fueron realizados con base en que, las tuberías no trabajaran a más del 90% de su capacidad, ya que en algunos casos, la tubería existente alcanza sus valores óptimos del 70% de su capacidad.
- La aplicación de las técnicas SUDS, representan una mejora sustancial en las condiciones hidráulicas de la red, tomando en cuenta que los caudales actuales exceden hasta un 153% de su capacidad.
- En cuanto a las implicaciones económicas que la aplicación de los SUDS representa, se tiene que la cuneta tipo para esta cuenca tendría un costo de alrededor de \$110.00 cada metro lineal; no obstante, parte de las ventajas es que estos costos consideran un proceso constructivo que disminuiría el impacto en el tránsito tanto de vehículos como de personas, ya que no implicaría la intervención en las tuberías existentes, que van a una profundidad mayor y tienen dimensiones mayores.
- Dado que la zona es de gran importancia para la actividad económica y social del AMSS, ya que es un acceso y salida principal para el flujo vehicular y peatonal, la aplicación de los métodos de Drenaje sostenible representa una mejora a las condiciones del sector en época lluviosa, disminuyendo las posibilidades de inundación y generando mejores condiciones para el desarrollo de las actividades productivas.

CUENCA S194 – BOULERVARD ORDEN DE MALTA

- La cuenca S194 se encontró colapsada en varios tramos de su red, ya que en el análisis se encontraron sectores que estaban superados en su capacidad hasta en un 154%.
- Teniendo como base los datos del análisis hidráulico, se determinó mediante el diseño conceptual, la aplicación conforme metodología SUDS, de una red de cunetas verdes y un pozo de infiltración que ayudaran a captar parte del flujo excedente de la red existente. Este flujo excedente podrá ser infiltrado en el pozo, o transportado mediante las cunetas hacia un punto menos crítico dentro de la red de drenajes actual.
- En esta cuenca, se diseñó un tipo de sección de cuneta verde de 60 x 100 cms.; además, cada tipo de cuneta cuenta con una sección inferior de retención, la cual está compuesta por material poroso (Coeficiente = 0.4), lo que permite la disminución del volumen de captación de la cuneta y la disminución del tiempo de llenado del Pozo de infiltración.
- Por otro lado, se diseñó un tipo de Pozo de infiltración con un diámetro de 4.50 metros, y una profundidad de 5.00 metros, el cual está diseñado para retener e infiltrar 16 metros cúbicos de su volumen total retenido (80 m³), en un periodo de 24 horas acorde a lo establecido en guía SUDS.
- Acorde al cálculo realizado, se tiene que, con la aplicación de las técnicas SUDS en la zona, la red hidráulica existente tendría una disminución los volúmenes de excedencia considerables, en algunos casos de más del doble del excedente inicial. Todos los cálculos fueron realizados para que las tuberías trabajaran a un 70% de su capacidad.
- La aplicación de las técnicas representa una mejora a las condiciones hidráulicas, tomando en cuenta que los caudales actuales exceden hasta en un 154% de su capacidad.

- En cuanto a las implicaciones económicas representa la aplicación de los SUDS, se tiene que la Cuneta verde tipo tendría un costo de alrededor de \$93.00 cada metro lineal, y los Pozos de infiltración representaría un costo de \$63.00 cada metro cúbico. Una de las ventajas es que estos costos consideran un proceso constructivo que disminuiría el impacto en el tránsito tanto de vehículos como de personas, ya que no implicaría la intervención en las tuberías existentes que van a una profundidad mayor y tienen dimensiones mayores.

5.3 RECOMENDACIONES

- Para el caso de las tres cuencas estudiadas, se debe tener claro que con la aplicación de los SUDS, no se cumple con totalmente con la optimización de la red de drenaje actual, ya que los caudales a controlar son muy grandes respecto de una red que tiene 50 años de vida, y que en sus inicios fue diseñada para un periodo de retorno de 5 años acorde a la Norma vigente, y construida bajo la Ley de Urbanismo y Construcción, por lo que es necesaria una intervención más a profundidad, no solamente desde el ámbito público, si no también, es de gran relevancia que el sector privado tome un rol protagónico en el proceso de la Cadena de control de drenaje, especialmente en los inmuebles existentes, los cuales no tienen un control, por no requerir permiso en su momento. Estas construcciones antiguas, pueden perfectamente contribuir a la problemática, implementando también técnicas puntuales tipo SUDS, dentro de sus espacios, tales como: Depósitos de captación, techos verdes, etc., con lo que también se estaría abonando al control de la escorrentía superficial del AMSS.
- La aplicación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible debe de ir acompañado de una gestión integral para la disposición de las aguas superficiales, en el sentido de la concientización del usuario en términos

de recolección de basura para poder alargar la vida útil de cada elemento presentado, y que este no sea, a la larga, un sitio de acumulación, más que una forma de recolección y transporte de las aguas lluvias.

- Dentro de toda el Área Metropolitana de San Salvador se tienen una variedad de sectores impermeabilizados en los que los niveles críticos de propensión a inundaciones urbanas son preocupantes, por lo que se le debe dar una gran importancia a la implementación de técnicas que permitan la correcta y efectiva disposición de los caudales recibidos durante las tormentas. Estos espacios en los que la vulnerabilidad aumenta con el tiempo, dadas las condiciones físicas y la importancia para la población; deberán ser intervenidos, a pesar de que esto pueda representar un costo económico alto, ya que, de no hacerse, las repercusiones a corto, mediano y largo plazo podrían ser graves para las actividades humana.
- Además de la implementación de las técnicas SUDS, es importante tener en cuenta desde la concepción de cualquier proyecto, que estos Sistemas requieren de un programa de mantenimiento continuo, tal cual lo indica la Guía Técnica, lo que es un punto neurálgico para que esta metodología pueda ser funcional a largo plazo.
- Se deberá seguir indagando en nuevas técnicas que sean aplicables a zonas de gran impermeabilización o con suelos poco permeables, que ayuden al control de la escorrentía. Es importante también, la inversión en la investigación técnica a detalle de las medidas a tomar en el AMSS, ya que esto representa la apertura de opciones para las ciudades que cada vez más tienen desarrollos de infraestructura más amplios, y que deberán implementar medidas que nos lleven a ser más responsables con la disposición de las escorrentías para generar el menor impacto posibles y la generación de más vulnerabilidad a inundaciones urbanas. Todo esto para la integración y creación de Normativas cada vez más sólidas y

sustentadas, que sean parte de un Plan integral del manejo de la escorrentía en toda el Área Metropolitana de San Salvador, y que sirva de base para su uso en otras zonas del país que desde ya se están desarrollando y creciendo, tal es el caso de las zonas urbanas de San Miguel, Santa Ana y otras.

- Existen ya en el mundo ejemplos a seguir, los cuales reflejan que no es imposible la implementación de SUDS, y su funcionalidad dentro de la infraestructura de las ciudades, lo cual viene acompañado de inserción de un marco jurídico que ayude a la regulación en el área de la construcción, tal es el caso de:
 - Plan de infraestructura Verde y creación del Green Infrastructure Task Force, en Nueva York, Estados Unidos.
 - Guía Nacional e Iniciativa Nacional del Agua (NWI), en Melbourne, Australia.
 - Programa de Ciudades Esponja, en Wuhan, China
 - Storm Water Management Manual, publicado e implementado en Malasia.
 - Guía de Integración de los SUDS a Espacios Públicos, en Londres, Reino Unido.
- Con lo anterior, se deberá pretender un cambio de mentalidad no sólo en los procesos constructivos, sino también en la finalidad de estos, ya que es necesario que no sólo se vea a los SUDS, como una forma de disponer de mejor manera la escorrentía superficial generada por la impermeabilización, y que se pase a tomar en cuenta la calidad del agua que se dispone y cómo esta impacta en su retorno a los mantos acuíferos. Por lo que es importante, un proceso de promoción de las técnicas de drenaje sostenible que permita un manejo integral del recurso hídrico de las ciudades.

- Por otro lado, es responsabilidad de las autoridades competentes y de todos los involucrados en la urbanización de la ciudad (diseñadores, desarrolladores, ejecutores y usuarios) el control de la impermeabilización de suelos en el AMSS. En la actualidad, no se cuenta con un ente responsable del ordenamiento de las obras de drenaje de aguas lluvias en el AMSS. La creación de una institución de este tipo es importante, no sólo para el mantenimiento y rehabilitación de la red, sino también para la generación de consciencia de las condiciones de la red de drenaje instalada desde hace décadas y del impacto que tiene el control de la mancha urbana en todo el desarrollo económico, ambiental y social de las ciudades, por lo que la aplicabilidad de los SUDS va de la mano la gestión del crecimiento urbano, en función de la red de drenajes existente. Todo esto con el fin de proteger, los procesos y actividades humanas, y también proteger las pocas zonas de infiltración existentes en el AMSS.
- También, es importante tomar en cuenta que el concepto SUDS involucra acciones que no son solamente medidas físicas o que requieren de mayor inversión; sino que, también se debe de tomar en cuenta la mejora y la implementación en la que todos y todas estamos involucrados, como gestión de la basura, control de fugas de Co₂ en los vehículos, gestión de materiales como las hojas de árboles o carga orgánica en la basura, etc., lo que también impacta de manera positiva en el rendimiento de las redes de drenaje existentes y futuras.
- Por último, pensar que los nuevos proyectos generen aun mayores mejoras en las inmediaciones de su proyecto para contribuir aun más a la gestión de escorrentía y no solo con lo que se establece en la guía SUDS o normativa vigente y generar nuevos incentivos para la promoción de SUDS en áreas urbanas o que ya son problemáticos en la gestión de la escorrentía.

BIBLIOGRAFIA.

- López Ramos, A. D. (s. f.). *Gestión de riesgos urbanos inundaciones urbanas en El Salvador*. Servicio Nacional de Estudios Territoriales. <http://www.snet.gob.sv/Publicaciones/InundacionesUrbanas.PDF>
- Fernández-Lavado, C. (2010). *Caracterización de la inundabilidad en el AMSS (El Salvador, CA)*. Programa IPGARAMSS. <http://www.xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2015/01/Caracterizacion-inundaciones-San-Salvador.pdf>
- El Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). (2003). *Análisis de riesgo por inundaciones y deslizamientos de tierra en la microcuenca del arenal de Monserrat*. <https://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00064/doc00064.htm>
- Aragón-Durand, F. (2013). *Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina*. (1ra ed.). https://www.preventionweb.net/files/42393_42393inundacionesenzonasurbanasdcu.pdf
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2010). *Mapa de pobreza urbana y exclusión social El Salvador*, (Vol. 1). https://www.sv.undp.org/content/el_salvador/es/home/library/poverty/--mapa-de-pobreza-urbana-y-exclusion-social-el-salvador--volumen.html
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2013). 2^a. *Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, El Salvador*. <http://rcc.marn.gob.sv/handle/123456789/11>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2017). *Informe nacional del estado de los riesgos y vulnerabilidades*. <https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/informe-nacional-del-estado-de-los-riesgos-y-vulnerabilidades/>
- OPAMSS. (s. f.). *Historia de la red de drenaje de aguas lluvias*.

- López Rodríguez, G. V., & Rodríguez Carranza, F. A. (2012). *Rediseño del sistema de alcantarillado sanitario, alcantarillado pluvial y propuesta de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de armenia*. Universidad de El Salvador.
- Cruz Martínez, C., Molina de Salguero, L., & Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (s. f.). *Criterios para el drenaje de aguas lluvias*. <https://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00134/doc00134-contenido.pdf>
- Asamblea Legislativa de la Republica de El Salvador. (2021). *Reglamento a la ley de urbanismo y construcción*. <https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/reglamento-a-la-ley-de-urbanismo-y-construccion/>
- Asamblea Legislativa de la Republica de El Salvador. (2021a). *Ley de urbanismo y construcción*. <https://www.asamblea.gob.sv/sites/default/files/documents/decretos/2493A10A-FB9A-44D3-83C7-29E8199763B8.pdf>
- Asamblea Legislativa de la Republica de El Salvador & OPAMSS. (2021). *Ley de desarrollo y ordenamiento territorial de AMSS*. https://issuu.com/coamss-opamss/docs/reformas_a_la_ley_y_reglamento_ldot-rldot-amss
- Asamblea Legislativa de la Republica de El Salvador & OPAMSS. (2021b). *Reglamento a la Ley de desarrollo y ordenamiento territorial de AMSS*. https://issuu.com/coamss-opamss/docs/reformas_a_la_ley_y_reglamento_ldot-rldot-amss
- OPAMSS. (s. f.-a). *Guía Hábitats Urbanos Sostenibles del AMSS*. https://opamss.org.sv/ova_doc/guia-habitats-urbanos-sostenibles/
- Tucci, C. E. (2007). *Gestión de Inundaciones Urbanas*. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pdf
- OPAMSS. (s. f.-b). *Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS*. https://opamss.org.sv/ova_doc/suds/

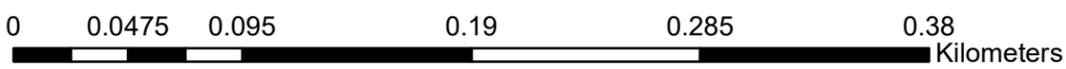
- Cabrera Aguirre, D. J., Huevo Guevara, J. O., & Linares Castro, L. M. (2013). *Propuesta metodológica de evaluación del comportamiento hidráulico de sistemas de drenaje pluvial ante el aumento de zonas impermeabilizadas en El Salvador*. Universidad de El Salvador.

ANEXOS



Leyenda

- Techos_Malta
- Verdes_Malta
- Calles_Malta



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

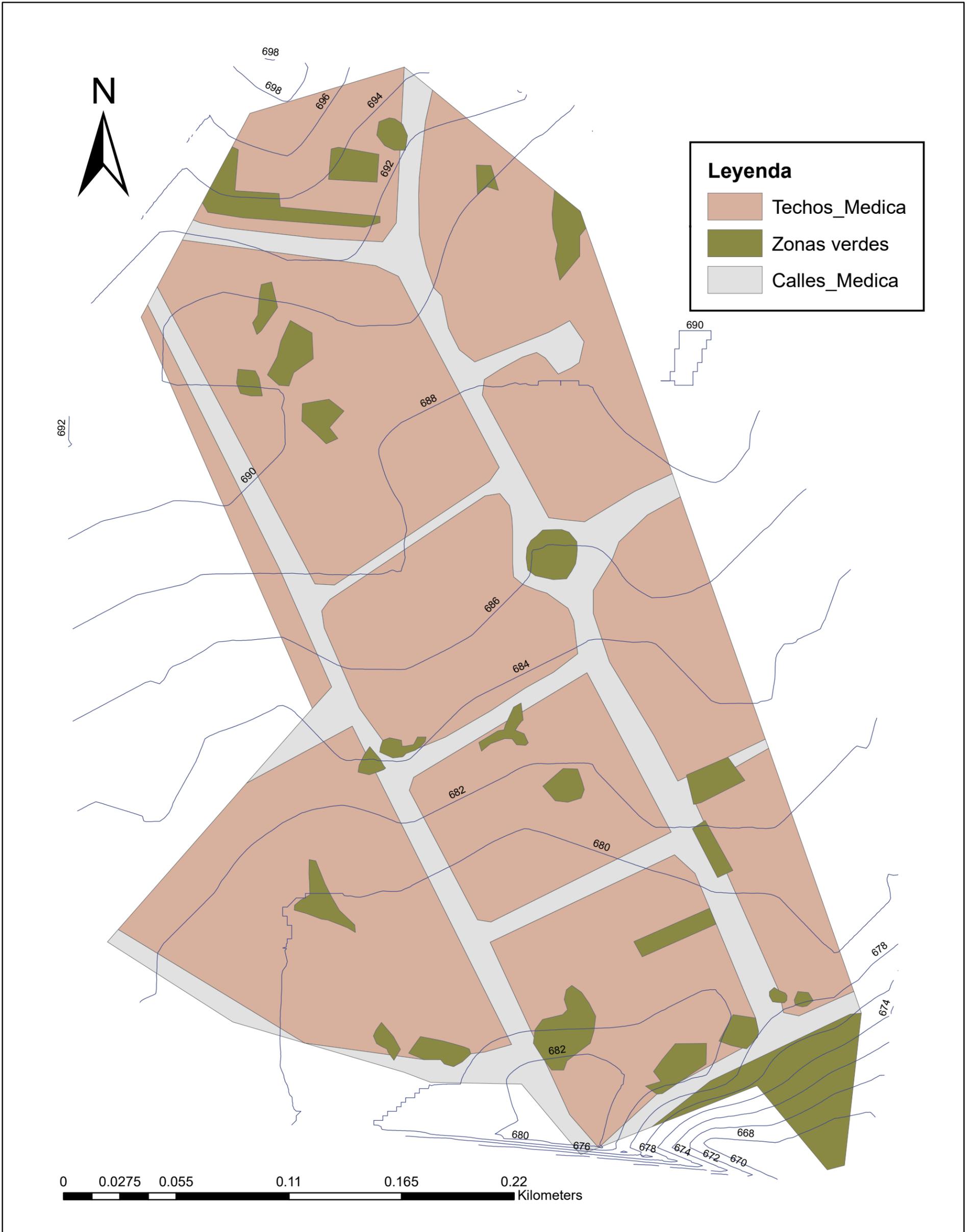
DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

MAPA:
ÁREAS Y CURVAS DE NIVEL
CUENCA S194 - MALTA.





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
 ING. INGRID ALFARO
 ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
 WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
 NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
 "PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
 PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
 DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
 EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
 SAN SALVADOR"

MAPA:
 ÁREAS Y CURVAS DE NIVEL
 CUENCA S172 - MÉDICA.





Leyenda

- Techos_Proceres
- Verdes_Proceres
- Calles_Proceres

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
 ING. INGRID ALFARO
 ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
 WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
 NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
 "PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
 PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
 DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
 EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
 SAN SALVADOR"

MAPA:
 ÁREAS Y CURVAS DE NIVEL
 CUENCA S164 - PRÓCERES.



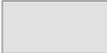


VERTEDERO

Leyenda

 Techos_Malta

 Verdes_Malta

 Calles_Malta

 Nodos_Malta

Drenajes_Malta

 Drenajes_Malta



0 0.045 0.09 0.18 0.27 0.36 Kilometers

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

MAPA:
RED DE DRENAJES
CUENCA S194 - MALTA.





Legenda

-  Techos_Medica
-  Zonas verdes
-  Calles_Medica
-  Nodos_Medica
- Drenajes_Medica**
-  Drenajes_Medica



0 0.0275 0.055 0.11 0.165 0.22 Kilometers

VERTEDERO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

MAPA:
RED DE DRENAJES
CUENCA S172 - MÉDICA.



VERTEDERO



Leyenda

-  Techos_Proceres
-  Verdes_Proceres
-  Calles_Proceres
-  Nodos_Proceres
- Drenajes_Proceres**
-  Drenajes_Proceres

0 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 Kilometers

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

MAPA:
RED DE DRENAJES
CUENCA S164 - PRÓCERES.





VERTEDERO

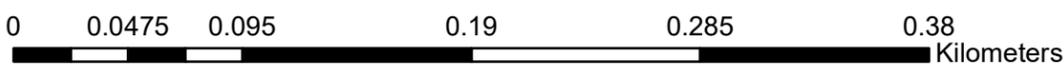
Leyenda

- Malta_-_S194
- Nodos_Malta

Tuberías_Malta

Status

- COLAPSO
- NORMAL



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

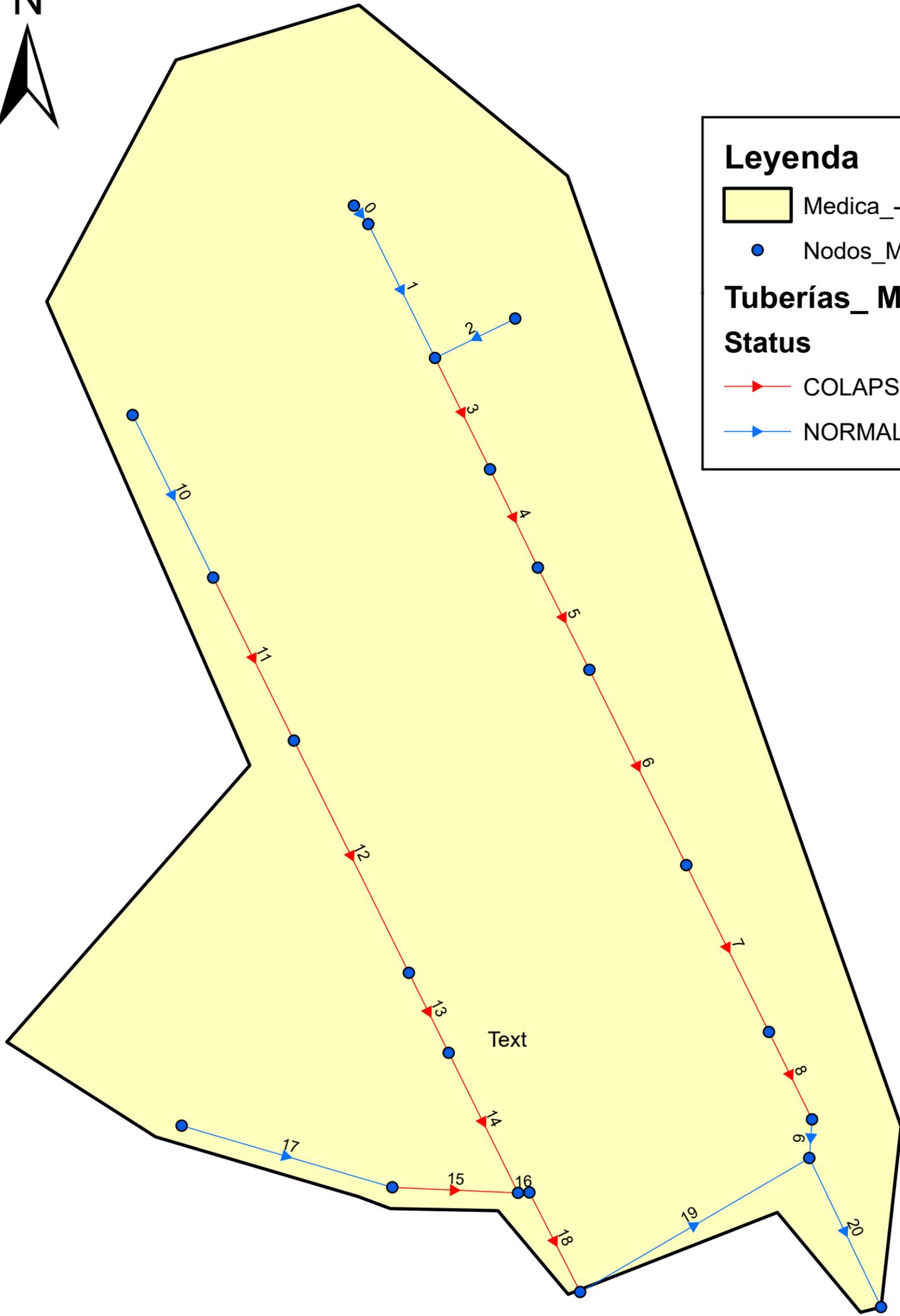
DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

MAPA:
ESTADO ACTUAL DE TUBERÍAS
CUENCA S194 - MALTA.





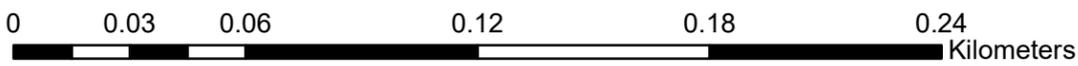
Leyenda

- Medica_-_S172
- Nodos_Medica

Tuberías_Medica

Status

- COLAPSO
- NORMAL



VERTEDERO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

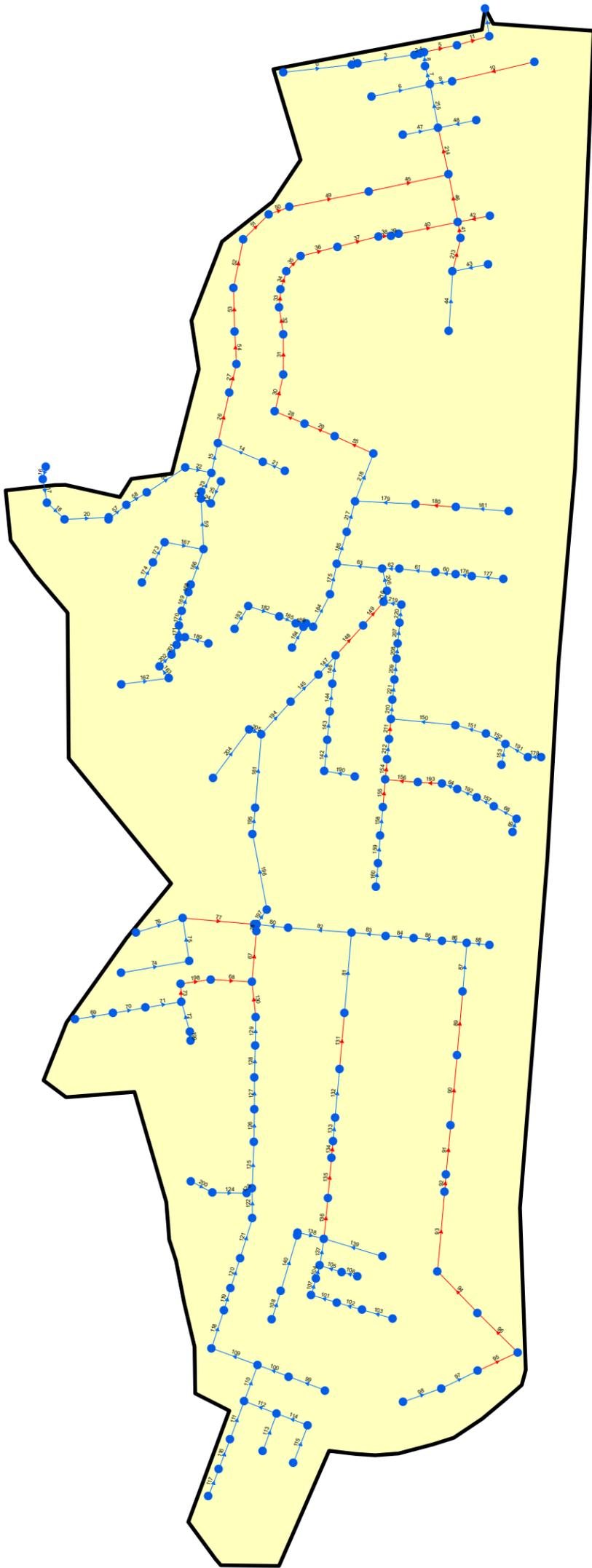
ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

MAPA:
ESTADO ACTUAL DE TUBERÍAS
CUENCA S172 - COLONIA MÉDICA.



VERTEDERO



Leyenda

 Próceres_-_164

 Nodos_Proceres

Tuberías_Proceres

Status

 COLAPSO

 NORMAL

0 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8
Kilometers

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

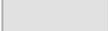
MAPA:
ESTADO ACTUAL DE TUBERÍAS
CUENCA S164 - PRÓCERES.

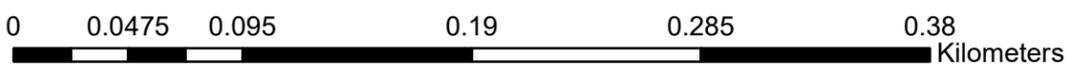




VERTEDERO

Leyenda

-  C2
-  Pozo_Malta
-  Calles_Malta
-  Techos_Malta
-  Verdes_Malta



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

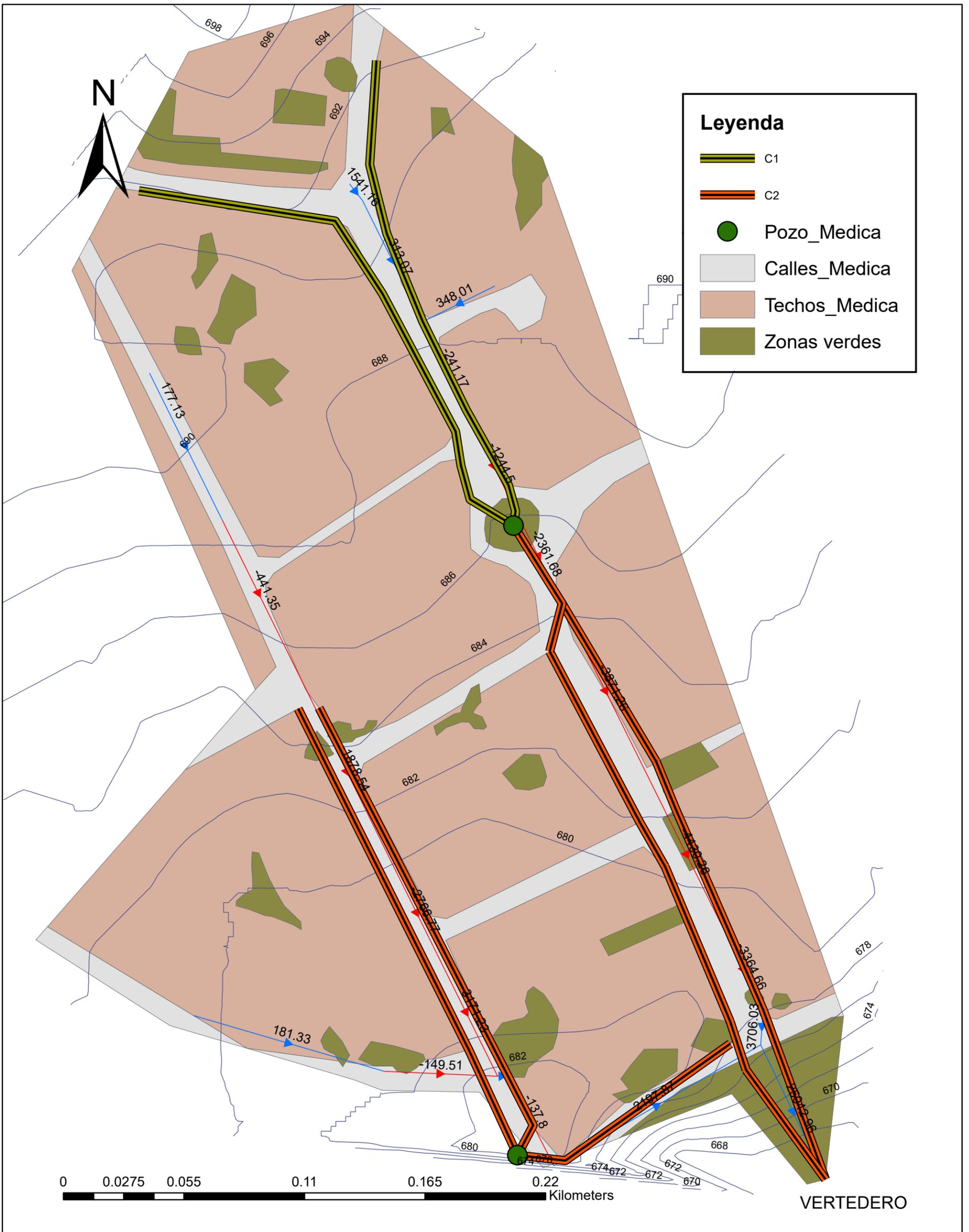
DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

MAPA:
PROPUESTA CONCEPTUAL
CUENCA S194 - MALTA.





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
 ING. INGRID ALFARO
 ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
 WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
 NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
 "PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
 PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
 DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
 EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
 SAN SALVADOR"

MAPA:
 PROPUESTA CONCEPTUAL
 CUENCA S172 - MEDICA.

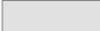
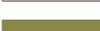




VERTEDERO



Leyenda

-  C2
-  Calles_Proceres
-  Techos_Proceres
-  Verdes_Proceres

0 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 Kilometers

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DOCENTES ASESORES:
ING. INGRID ALFARO
ING. EDWIN ESCOBAR

ESTUDIANTES:
WILBER JONATHAN SANTOS FLORES
NOEL HIDALGO RODRÍGUEZ NIETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"PROPUESTA ECONÓMICA, SOCIAL Y AMBIENTAL
PARA LA APLICACIÓN DE SISTEMAS URBANOS
DE DRENAJE SOSTENIBLE EN EDIFICACIONES
EXISTENTES DEL ÁREA METROPOLITANA DE
SAN SALVADOR"

MAPA:
PROPUESTA CONCEPTUAL
CUENCA S164 - PROCERES.

