



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

Análisis de factibilidad de sistemas urbanos de drenaje  
sostenible para su implementación en la Zona Metropolitana  
de San Luis Potosí

## **T E S I S**

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Nicolás Alan Pérez Durán

Asesor:

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán

San Luis Potosí, S. L. P.

Julio de 2021



**FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UASLP**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

18 de junio de 2020

**ING. NICOLÁS ALAN PÉREZ DURAN  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Rodolfo Cisneros Almazan**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 18 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Análisis de factibilidad de sistemas urbanos de drenaje sostenible para su implementación en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí"**

Introducción.

1. Situación actual de los recursos hídricos en un contexto urbano.
2. Servicios de regulación y gestión de la escorrentía urbana.
3. Sistemas urbanos de drenaje sostenible hacia una gestión integral de los recursos hídricos urbanos.
4. Análisis Multi-Objetivo para determinar la combinación óptima de sistemas urbanos de drenaje sostenible. Caso de estudio: Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

Conclusiones.

Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**ATENTAMENTE**

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ  
DIRECTOR.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Copia. Archivo.  
\*etn.

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria CP 76220  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (441) 826 2336, 2337  
fax (441) 826 2336

"1945-2020: 75 años de formación de profesionales en la Facultad de Ingeniería"

## Agradecimientos

A la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)** y al **Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP)**, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al **Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por permitirme ser su becario y, además, por el apoyo económico brindado durante la maestría y durante la estancia de investigación en España.

A mi director de tesis, **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán**, por el apoyo brindado durante mis estudios de posgrado, por sus consejos, sus enseñanzas y por la dirección de esta tesis, además de su paciencia y confianza a pesar de todo. Infinitas gracias.

Al **Dr. Sergio Zubelzu Mínguez**, por aceptarme en la estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y haberme brindado los conocimientos y herramientas necesarias para el desarrollo de esta tesis.

Al **Dr. Oscar Reyes Pérez** y al **Dr. Clemente Rodríguez Cuevas**, por su confianza, su tiempo, opiniones, y asesoría para el desarrollo de esta tesis.

A la **M.I. Beatriz Saucedo Delgado** y a la **M.I. Jesica García Torres**, por acompañarme durante todo este camino, por su amistad, por su dedicación como profesionales y por todo ese amor recibido.

A la **M.I. María Inés Navarro**, por ser mi inspiración cada día en el posgrado, por tu pasión y dedicación y por el gran ser humano que eres, gracias.

Por último, sin quitar importancia alguna, a todos mis profesores, y amigos de la **Maestría en Tecnología y Gestión del Agua**, y a todas aquellas personas que caminaron conmigo, sin duda es gracias a ustedes que el propósito se ha cumplido.

## Dedicatoria

*A mis padres y a mi hermano, por su amor incondicional.*

*A mi hermana Zaira, que siempre ha estado apoyándome, inclusive en la  
adversidad.*

# Índice General

Lista de Figuras.....	8
Lista de Tablas .....	10
Resumen.....	12
Abstract .....	13
Introducción .....	14
Antecedentes .....	16
Justificación.....	20
Hipótesis y Objetivos.....	22
Hipótesis.....	22
Objetivo General .....	22
Objetivos Específicos.....	22
1. Situación actual de los recursos hídricos en un contexto urbano .....	23
1.1. Recursos Hídricos en el Mundo.....	24
1.2. Recursos hídricos en áreas urbanas de México .....	26
1.3. Recursos hídricos en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP).....	29
2. Servicios de regulación y gestión de la escorrentía urbana .....	32
2.1. Sistemas de drenaje pluvial urbano .....	33
2.2. Ciclo hidrológico urbano .....	35
2.2.1. Consecuencias de la urbanización.....	37
2.3. Instrumentos de gestión de agua urbana.....	40
2.3.1. Instituciones relacionadas con la gestión del agua urbana.....	40
2.3.2. Políticas de sostenibilidad hídrica en el país .....	43
2.4. Infraestructura sostenible .....	45

3. Sistemas Urbanos de drenaje sostenible hacia una gestión integral de los recursos hídricos urbanos. ....	47
3.1. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).....	47
3.1.1. Aplicación de los enfoques.....	52
3.2. Consideraciones Técnicas e Infraestructura .....	65
3.2.1. Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) .....	66
3.2.2. Cubiertas verdes/techos verdes.....	71
3.2.3. Pavimentos permeables.....	73
3.2.4. Sistemas de Infiltración .....	75
3.2.5. Sistemas de Biorretención.....	76
3.2.6. Sistemas de Tratamiento.....	77
3.3. Modelos Disponibles para Simulación de SUDS.....	78
3.3.1. Tipología de modelos de gestión de aguas superficiales .....	79
3.3.2. Metodología de aplicación de los modelos de SUDS .....	88
4. Análisis Multi-Objetivo para determinar la combinación óptima de sistemas urbanos de drenaje sostenible. Caso de estudio: Zona Metropolitana de San Luis Potosí. ....	93
4.1. Introducción .....	93
4.2. Área de Estudio: Zona Metropolitana de San Luis Potosí. ....	95
4.2.1. Generalidades .....	95
4.2.2. Hidrología .....	97
4.3. Análisis Urbano de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí.....	106
4.3.1. Crecimiento Urbano .....	107
4.3.2. Sectorización de la ZMSLP .....	110
4.4. Análisis Hidrológico .....	115
4.5. Balance Hídrico Volumétrico General .....	117
4.6. Resultados .....	122

4.7. Discusión y análisis de resultados .....	136
4.7.1. Desafíos y perspectivas futuras.....	138
Conclusiones .....	143
Referencias.....	145
Anexos.....	153

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Valores promedio anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017..	27
<b>Figura 2.</b> Rutas hidrológicas generalizadas del ciclo del agua. ....	35
<b>Figura 3.</b> Rutas hidrológicas generalizadas en un entorno urbano (Izquierda) y en un entorno natural (Derecha).....	36
<b>Figura 4.</b> Categorías principales en el diseño de SUDS.. ....	49
<b>Figura 5.</b> Enfoques de la Filosofía SUDS.....	50
<b>Figura 6.</b> Etapas de diseño de SUDS.....	52
<b>Figura 7.</b> Proceso de diseño de drenaje: vínculos y planificación de uso de suelo. ....	54
<b>Figura 8.</b> Tipologías de Desarrollo urbano. ....	63
<b>Figura 9.</b> Tipologías dentro del paisaje urbano. Adaptado de:.....	64
<b>Figura 10.</b> Configuración genérica de diferentes componentes dentro de SUDS .....	65
<b>Figura 11.</b> SCALL basado en gravedad y sus componentes .....	68
<b>Figura 12.</b> SCALL basado en Bombeo y sus componentes. ....	69
<b>Figura 13.</b> SCALL implementados en viviendas individuales.....	70
<b>Figura 14.</b> Secciones típicas de una instalación de cubierta verde.....	71
<b>Figura 15.</b> Cubierta Verde instalada en Infonavit en CDMX. ....	72
<b>Figura 16.</b> Sistema de pavimento permeable/poroso. ....	73
<b>Figura 17.</b> Pavimentos permeables instalados .....	74
<b>Figura 18.</b> Estructura modular de MIKE URBAN.. ....	89
<b>Figura 19.</b> Proceso de modelado de SWMM. ....	92
<b>Figura 20.</b> Localización de la ZMSLP.....	95
<b>Figura 21.</b> Climograma de la ZMSLP.....	96
<b>Figura 22.</b> Aprovechamiento de agua subterránea por usos.....	99
<b>Figura 23.</b> Crecimiento de la superficie urbana de la ZMSLP 1970-2017 .....	108
<b>Figura 24.</b> Sectorización de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí. ....	110
<b>Figura 25.</b> Sectorización - Subsector 1. ....	111
<b>Figura 26.</b> Sectorización - Subsector 2. ....	112
<b>Figura 27.</b> Sectorización - Subsector 3. ....	113
<b>Figura 28.</b> Cuencas sanitarias dentro del área urbana de la ZMSLP (Fuente: INTERAPAS) .....	114
<b>Figura 29.</b> Localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas. propia. ....	116



<b>Figura 30.</b> Curvas I-D-Tr de los valores de precipitación analizados.....	117
<b>Figura 31.</b> Esquemmatización del Balance hídrico volumétrico general. ....	120
<b>Figura 32.</b> Contribución de los usos del suelo a CUD.....	125
<b>Figura 33.</b> Contribución de los usos del suelo a D .....	126
<b>Figura 34.</b> Volumen de agua almacenada (VSUD) .....	126
<b>Figura 35.</b> Valores D y CUD resultantes y umbrales propuestos para SZ1, permitiendo el incremento del uso residencial intensivo ( <b>arriba</b> ) o semi-intensivo ( <b>abajo</b> ). ....	128
<b>Figura 36.</b> Valores D y CUD resultantes y umbrales propuestos para SZ2, permitiendo el incremento del uso residencial intensivo ( <b>arriba</b> ) o semi-intensivo ( <b>abajo</b> ). ....	129
<b>Figura 37.</b> Valores D y CUD resultantes y umbrales propuestos para SZ3, permitiendo el incremento del uso residencial intensivo ( <b>arriba</b> ) o semi-intensivo ( <b>abajo</b> ). ....	130
<b>Figura 38.</b> Evolución anual de CUD, D, VSUD, IR e INSUD para las tres cuencas (subsectores) analizadas. ....	133
<b>Figura 39.</b> Nivel CUD y SUD para 5 (columna izquierda) y 100 (columna derecha) período de retorno, 1.1 h de duración, eventos de tormenta .....	134
<b>Figura 40.</b> Diferencia de volumen descargado a CUD entre la combinación óptima de SUDS y la situación original o previas al desarrollo para eventos de lluvia de período de retorno de 5 años( <b>arriba</b> ) y 100 años ( <b>abajo</b> ). ....	135

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Descripción de los sistemas urbanos de drenaje y su transformación a través del tiempo (Agua 1.0 – Agua 4.0).....	16
<b>Tabla 2.</b> Agrupación de usos de la clasificación REPGA. ....	28
<b>Tabla 3.</b> Distribución de usos consuntivos en la ZMSLP. ....	29
<b>Tabla 4.</b> Parámetros clave en el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano y los resultados esperados. ....	33
<b>Tabla 5.</b> Etapa 1: Establecimiento estategico de los objetios de gestión de agua superficial.....	57
<b>Tabla 6.</b> Etapa 2: Diseño conceptual de SUDS.	
<b>Tabla 7.</b> Etapa 3: Diseño esquemático de SUDS. ....	59
<b>Tabla 8.</b> Etapa 4: Diseño detallado de SUDS.:.....	61
<b>Tabla 9.</b> Objetivos e implicaciones de diseño de SCALL.....	66
<b>Tabla 10.</b> Modelos disponibles e información introductoria.....	79
<b>Tabla 11.</b> Usos potenciales de los modelos. ● = uso y O = pueden ser usados indirectamente. ....	80
<b>Tabla 12.</b> Dispositivos SUDS y medidas incluidas en la interfase de los modelos seleccionados....	85
<b>Tabla 13.</b> Elementos físicos de modelado de SWMM. ....	90
<b>Tabla 14.</b> Aprovechamientos superficiales. ....	97
<b>Tabla 15.</b> Extracción de agua por categorías (Mm <sup>3</sup> /año). ....	98
<b>Tabla 16.</b> Disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero de San Luis Potosí.....	102
<b>Tabla 17.</b> Usuarios del organismo operador de aguas en la ZMSLP. ....	103
<b>Tabla 18.</b> Cobertura de las PTAR en la ZMSLP. ....	104
<b>Tabla 19.</b> Aforos realizados a los colectores de aguas residuales. ....	104
<b>Tabla 20.</b> Aforos de los colectores de aguas residuales en la ZMSLP .....	105
<b>Tabla 21.</b> Montos por aprovechamiento de agua residual (Interapas, 2018) .....	106
<b>Tabla 22.</b> Categorías de uso de suelo para cada subsector (cuena) de la ZMSLP (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> ).....	111
<b>Tabla 23.</b> Usos de Suelo (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> ) para la cuena del Subsector 1. ....	111
<b>Tabla 24.</b> Número total de viviendas y población total en el Subsector 1. ....	112
<b>Tabla 24.</b> Usos de Suelo (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> ) para la cuena del Sector 2.....	112
<b>Tabla 25.</b> Número total de viviendas y población total en el sector 2. ....	113
<b>Tabla 26.</b> Usos de Suelo (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> ) para la cuena del Subsector 3 .....	113
<b>Tabla 27.</b> Número total de viviendas y población total en el Subsector 3. ....	114

<b>Tabla 29.</b> Estaciones Meteorológicas seleccionadas de la ZMSLP .....	115
<b>Tabla 30.</b> Número de Curva (CN) para cada uno de los usos de suelo definidos; pavimentos permeables y cubiertas verdes .....	118
<b>Tabla 31.</b> Costos unitarios para la optimización del modelo .....	122
<b>Tabla 32.</b> Principales variables de balance de agua para el estado actual. ....	123
<b>Tabla 33.</b> Principales variables de equilibrio hídrico para el estado de predesarrollo. ....	123
<b>Tabla 34.</b> Resumen de límites para D y CUD (m <sup>3</sup> ). ....	124
<b>Tabla 35.</b> Combinación óptima de SUDS por subsectores. ....	124
<b>Tabla 36.</b> Principales variables de balance hídrico para una combinación óptima de SUDS. ....	125
<b>Tabla 37.</b> Escenarios para analizar la sensibilidad de la combinación óptima de SUD a los desarrollos urbanos (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> ). ....	127
<b>Tabla 38.</b> Combinación óptima de <i>kppin</i> , <i>kgrin</i> , <i>kino kppsín</i> y <i>kgrsin</i> , <i>kpp</i> y <i>ksin</i> para nuevos desarrollos. ....	131

## Resumen

En esta investigación se presenta un análisis de factibilidad de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) para su implementación a escala ciudad. Se realizó una evaluación que va de los aspectos climatológicos e hidrológicos, hasta aquellos aspectos que se involucran en el crecimiento urbano de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP). Simultáneamente, se realizó una revisión de SUDS en la cual se muestran los aspectos fundamentales de diseño, las consideraciones técnicas y los principales modelos disponibles para su modelación.

Se consideró un conjunto completo de categorías SUDS en las que se incluyen infraestructuras destinadas a detener, reutilizar localmente o infiltrar la precipitación. Se propone un balance hídrico volumétrico para modelar los procesos hidrológicos en cuencas urbanas. Así mismo, se propone un enfoque Multi-Objetivo que combina una función de costo y objetivos tanto para recargar el acuífero como para imitar la contribución de la escorrentía pluvial a los cursos de agua para encontrar la combinación óptima de SUDS. El balance hídrico se ejecutó con cada combinación posible de SUDS y se encontró el conjunto óptimo de SUDS.

El método se aplicó a la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP) (México). Las soluciones óptimas en este caso claramente promueven la retención de la escorrentía superficial y la reutilización sobre pavimentos porosos y techos verdes, los cuales fueron sensibles a los costos considerados. También se estudiaron los requisitos de los SUDS para los posibles nuevos desarrollos urbanos de cada cuenca para cumplir con los objetivos hidrológicos originales. El método requiere personalizar la función de costos y utilizar datos climáticos representativos.

*Palabras Clave:* Gestión de aguas pluviales; escorrentía superficial; reutilización de agua; desarrollo de bajo impacto; sistemas urbanos de drenaje sostenible; captación de agua de lluvia.

## Abstract

This research presents a feasibility analysis of sustainable urban drainage systems for their implementation at city scale. An evaluation was carried out that goes from the climatological and hydrological aspects to those aspects that are involved in the urban growth of the Metropolitan Area of San Luis Potosí (ZMSLP) review of SUDS was carried out in which the fundamental aspects of design, technical considerations, and the main models available for modeling are shown.

A comprehensive set of SUDs categories comprising infrastructures aimed at either detaining and locally reusing or infiltrating precipitation are considered. A volumetric water balance is proposed for modelling hydrological processes in urban catchments. A multi-criteria approach combining a cost function and aims for both recharging aquifers and limiting runoff contribution to water courses is proposed to find the optimal SUDs combination. The water balance was run with each possible SUDs combination and the optimal set of SUDs was found.

The method was applied to the Metropolitan Area of San Luis Potosí (Mexico). The optimal solutions in this case clearly promoted surface runoff detention and reuse over porous pavements and green roofs but they were sensitive to the considered costs. The SUD requirements to potential new urban developments for each catchment to comply with the original hydrological aims were also studied. The method requires customizing the cost function and using representative climatic data.

*Keywords:* Stormwater management; surface runoff; water reuse; low impact development; sustainable urban drainage systems; volumetric water balance; urban catchment

## Introducción

El consumo global de los recursos hídricos ha ido en aumento a una tasa anual del 1% desde la última década. Se prevé que el uso de los recursos hídricos siga en aumento a nivel mundial, en función del crecimiento poblacional, el desarrollo económico y la alteración de los patrones de consumo. En la actualidad una gran parte de la población mundial (4.2 de 7.6 mil millones en 2018) se concentra en ciudades (WWAP, 2019). Las proyecciones futuras sobre los asentamientos urbanos muestran que más del 50% de la población vivirá en ciudades en vías de desarrollo, asegurando que esta proporción seguirá en aumento conforme se produzca la gran mayoría del crecimiento poblacional en dichas áreas. En consecuencia, los desafíos asociados con la sostenibilidad urbana, la presión sobre los recursos hídricos urbanos se irán agravando cada vez más (WWAP, 2018).

A medida en que las ciudades continúan expandiéndose, los efectos sobre el ciclo hidrológico se están intensificando debido al impacto del cambio en los patrones climáticos (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2018). A pesar de ser considerados como centros de desarrollo económico e innovación tecnológica los asentamientos urbanos están en un constante desequilibrio en áreas relacionadas con la salud, agua, saneamiento, educación y oportunidades económicas (WWAP, 2020). Un claro ejemplo, es la deficiencia en servicios de saneamiento e infraestructura de suministro de agua, principalmente en áreas urbanas sin planeación previa. En este sentido, los efectos de la rápida urbanización sobre la escasez de agua se verán reflejados de manera inmediata, mientras que los impactos del cambio climático serán en periodos más largos.

La gestión de los recursos hídricos es uno de los desafíos primordiales que enfrentan las ciudades. Tradicionalmente la gestión de aguas pluviales en los centros urbanos se ha basado en sistemas centralizados que buscan evacuar la escorrentía pluvial lo más rápido posible a través de redes de drenaje que la recogen, tratan y transportan al destino final (Rodríguez-Sinobas, Zubelzu, Perales-Momparler, & Canogar, 2018). Estos sistemas son actualmente deficientes debido a que se basan en un enfoque predicción – control y presentan limitaciones asociadas con el cambio climático, los procesos de urbanización y las circunstancias sociales, acentuando la necesidad de una gestión estratégica e integral de la dimensión humana que acople condiciones socio – económicas y ambientales que estén orientadas a un desarrollo sostenible.

En respuesta a la búsqueda de un nuevo enfoque a la gestión convencional de aguas pluviales, surgen una serie de conceptos para la planificación de los recursos hídricos urbanos. En estos se

incluyen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), basados en dinámicas naturales, ya que buscan imitar los patrones hidrológicos naturales del sitio (Infiltración, evaporación, evapotranspiración, filtración, retención y reutilización) previos a su desarrollo.(C. S. Perales-Momparler, 2015). Los SUDS incluyen diferentes infraestructuras orientadas al manejo de aguas pluviales tales como captación de agua de lluvia, cubiertas verdes, pavimentos permeables y áreas de infiltración.

Una serie de investigaciones se han desarrollado para la instalación de SUDS en áreas urbanas. Algunas de ellas centradas en la revisión de los enfoques, en la evaluación espacio – temporal y en la incorporación de SUDS a los procesos de planeación urbana (Dietz, 2007; Fletcher et al., 2015). Mientras que otras se enfocan en la determinación de sitios óptimos de implementación y en la propuesta de funciones para su identificación (Wang, Sweetapple, Fu, Farmani, & Butler, 2017). Aun así, existen incógnitas por resolver p.ej. hace falta la definición de objetivos de diseño más claros, ya que actualmente no van más allá de diseños basados en eventos de lluvia y los criterios de diseño establecidos siguen los estándares tradicionales, como la minimización de la escorrentía, maximización de la recarga del acuífero, y la disminución de funciones de costos (Zubelzu, Rodríguez-Sinobas, Andrés-Domenech, Castillo-Rodríguez, & Perales-Momparler, 2019). Lo que garantiza que su funcionalidad no irá más allá del cumplimiento de objetivos simples y se limitará la obtención de los beneficios potenciales que pueden ser provistos por los SUDS.

La operatividad y el diseño de los SUDS va más allá del simple manejo de escorrentía, ya que no solamente deben estar orientados a la prevención de desastres, sino que tiene que incorporar las variables involucradas en todo el sistema hidrológico ya que los SUDS alteran varios de estos procesos; además de conceptos como la reutilización local y comprender las posibles combinaciones de SUDS para el aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos. Los SUDS deben administrar eficientemente la escorrentía para su uso en una amplia gama de situaciones, inclusive si no son incorporados, con la finalidad de determinar soluciones óptimas y no solamente para eventos específicos de diseño (Zubelzu et al., 2019).

En la presente investigación se realiza un análisis de factibilidad para la implementación de SUDS en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP). Se propone una metodología para determinar la combinación óptima de SUDS a escala ciudad, se abarca el sistema hidrológico completo y se consideró un conjunto integral de categorías de SUDS, las cuales comprenden la infraestructura destinada a detener y reutilizar localmente la escorrentía o infiltrarla al acuífero.

Para este propósito, la dinámica hidrológica se modeló con un balance hídrico, en el cual se incorporan los flujos de agua generados por los procesos hidrológicos dentro del área urbana de la ZMSLP. Así mismo, con la finalidad de complementar la investigación, se establece un proceso Multi-Criterio en el cual se abarcan objetivos económicos e hidrológicos.

## Antecedentes

Desde el punto de vista histórico, los sistemas urbanos de drenaje se han identificado mediante varias perspectivas en el transcurso del tiempo, y han sido influenciadas por las condiciones de su entorno físico (Burian & Edwards, 2002). Su enfoque central busca la recolección y evacuación del agua de lluvia del área urbana; sugiriendo que los sistemas que finalmente alcanzaban sus objetivos lo hacían basándose en métodos de prueba y error (Butler & Parkinson, 1997). El desarrollo de dichos sistemas ha evolucionado a través de cuatro periodos principales: el mundo antiguo, el imperio romano, el periodo post-romano hasta el siglo XIX, y, por último, desde el siglo XIX hasta la actualidad (Nguyen et al., 2019). La historia de las tecnologías enfocadas a los recursos hídricos se puede dividir en 4 periodos (designados como Agua 1.0 a 4.0) que abarcan desde 2500 a.C. hasta la actualidad (**Tabla 1.**).

**Tabla 1.** Descripción de los sistemas urbanos de drenaje y su transformación a través del tiempo (Agua 1.0 – Agua 4.0). Adaptado de: (Nguyen et al., 2019).

No.	Periodo	Objetivo	Logros	Limitantes
1	Civilización Antigua (Agua 1.0)	Colecta de agua de lluvia; reducción de inundaciones; y convección de residuos	Establecimiento exitoso y costoso de sistemas de alcantarillado en paralelo con la planeación social.	Nula optimización y falta de estándares previos a la construcción.
2	Imperio Romano (Agua 2.0)	Colecta de agua de lluvia en tejados; Mitigación de inundación; y almacenamiento de agua de lluvia en estructuras subterráneas	Prácticas uniformes de drenaje en carreteras y construcción de alcantarillado subterráneo.	Falta de cálculo en el equilibrio entre el volumen de almacenamiento y el suministro de agua.
3	Época Post-Romana – Siglo XIX (Agua 3.0)	Mitigación de inundaciones y remoción de agua residual	Carreteras de piedra con drenaje superficial y subterráneo con una corona central y canales laterales; y alcantarillas de madera.	Problemas de drenaje urbano por falta de mantenimiento al alcantarillado y la exposición a riesgos a la salud.



No.	Periodo	Objetivo	Logros	Limitantes
4	Siglo XIX – Actualidad (Agua 4.0)	Integración de problemas relacionados al agua urbana	Prácticas de construcción y mantenimiento mejoradas; tratamiento de agua residual; aplicación de modelos digitales para el diseño y construcción; concientización ambiental.	Los métodos para el diseño y planificación de gestión sostenible del agua urbana están en investigación y desarrollo.

El crecimiento poblacional en las civilizaciones antiguas hacia el imperio Romano conduce al periodo denominado Agua 1.0, principalmente por la necesidad de satisfacer el aumento de la demanda de agua; por lo tanto, se inicia con el diseño y la construcción de un sistema para la importación y distribución de agua a través de redes de tuberías. El periodo Agua 2.0 surge frente a la necesidad de resolver la generación de agua residual por la industria en E.U, estableciéndose un sistema para la purificación de agua (biopelícula). El enfoque principal del periodo Agua 3.0. es la consolidación y la regulación de flujos de aguas residuales a través de su retención y su tratamiento previo a la descarga en cuerpos de agua. Por último, el periodo Agua 4.0 es dirigido a la próxima generación de sistemas de drenaje, que van enfocados a incorporar los problemas del agua urbana mediante el reemplazo de infraestructura obsoleta y la concientización de la población en cuanto a la gestión de los recursos hídricos.

Varias soluciones a los sistemas urbanos de drenaje son remontadas a la antigüedad. Se introdujeron importantes avances tecnológicos en los sistemas de drenaje urbano. Por ejemplo: La edificación de depósitos/tanques para la recolección, almacenamiento y aprovechamiento local de agua; el desarrollo de prácticas uniformes de drenaje en los sistemas de carreteras/caminos; y la construcción de canales subterráneos para establecer una red de drenaje (Hlavinec & Zeleňáková, 2015). Aunque no por diseño, la vinculación de los sistemas de suministro de agua y los sistemas de drenaje de aguas residuales, marca uno de los primeros pasos en el establecimiento de un ciclo hidrológico urbano.

En recientes décadas, la gestión sobre las aguas pluviales ha experimentado un cambio progresivo impulsado en parte por la variación en la dinámica poblacional en áreas urbanas, al aumento de la demanda de recursos hídricos, a la modificación de la superficie natural y a los riesgos de inundación asociados al cambio climático (Goulden, Portman, Carmon, & Alon-Mozes, 2018). Así

mismo, el establecimiento global de Agencias de Protección del Medio Ambiente también tuvo un impacto importante (Radcliffe, 2019). Progresivamente, la gestión comenzó a comprender todo el ciclo hidrológico urbano e incorpora conceptos como la retención, refiriéndose a los esquemas/métodos por los cuales las aguas pluviales se mantienen cierto tiempo para después continuar con los procesos naturales del ciclo hidrológico e incorporarlo a un contexto de gestión integral de la captación o gestión total de la captación.

La adopción de nuevos enfoques ha sido fundamental en la evolución y desarrollo de áreas urbanas, los cuales plantean objetivos integrales con la finalidad de garantizar que el diseño y/o la planeación urbana acoplen adecuadamente las oportunidades que estos proveen (Ashley et al., 2013). Esto ha dado como resultado una variedad de descriptores tecnológicos que, aunque su conceptualización es similar, adoptan diferentes títulos a nivel global: Desarrollo de Bajo Impacto (Low Impact Development) e Infraestructura Verde (Green Infrastructure) en Norte América y Nueva Zelanda; Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible( Sustainable Urban Drainage Systems) en Gran Bretaña y España; Diseño Urbano Sensible al Agua (Water Sensitive Urban Design) en Australia y África; Medidas de Control de Aguas Pluviales (Stormwater Control Measures) y Ciudades Esponja (Sponge Cities) en Asia.

Una serie de investigaciones se han desarrollado para la instalación de Sistemas Urbanos de Drenaje (SUDS) en áreas urbanas, tales como: Binesh, Niksokhan, Sarang, & Rauch, (2019), en la ciudad de Teherán, Irán; S. Perales-Momparler et al., (2017), en dos ciudades de la región Valenciana, España; Rodríguez-Sinobas, Zubelzu, Perales-Momparler, & Canogar, en la nueva ciudad inteligente, Valdebebas en Madrid, España; Pappalardo, La Rosa, Campisano & La Greca, en la ciudad de Avola, un municipio en la costa sureste de Sicilia, Italia (Pappalardo, La Rosa, Campisano, & La Greca, 2017); etc. Los SUDS, como infraestructura verde, reúnen tecnología, ingeniería y gobernanza, ayudando en aspectos de calidad y cantidad de agua de lluvia de una manera integral y sostenible, al mismo tiempo que ofrece múltiples beneficios

En México, existen múltiples proyectos individuales destinados a la gestión del agua de lluvia en áreas urbanas, los cuales han sido realizados por instituciones y organizaciones a lo largo del país que, aunque no cuenten con especificaciones referidas a los SUDS, se encuentra que son iniciativas ligadas al concepto de infraestructura verde: Jiménez Abarca, (2017), en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); Martínez Cuéllar, en la zona sur de Ciudad de México (Martínez Cuéllar,

2015); Ávila Morales, (2013), en Pachuca, Hidalgo ; Pérez-Uresti, Ponce-Ortega, & Jiménez-Gutiérrez, (2019), en Querétaro, México.

En el país, la investigación ha sido enfocada en su mayoría a Sistemas de Captación de Agua (SCALL) orientada principalmente al diseño e implementación (Ortiz-Moreno, Masera-Cerutti, & Fuentes-Gutiérrez, 2014; Pérez, Escobar, & Fragozo, 2018). Sin embargo, se requiere un análisis sobre la viabilidad y la gestión de los SCALL, con el fin de impulsar el desarrollo de regulaciones específicas sobre dichos sistemas. En recientes años se ha mostrado un avance relacionado con el aspecto legal de los SCALL, incluyendo el artículo 17 Ter a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) la siguiente disposición: *“La instalación del sistema de captación de agua pluvial en aquellos inmuebles a cargo de las dependencias de la Administración Pública Federal, el Poder Legislativo Federal y el Poder Judicial de la Federación”* (Diario Oficial de la Federación, 2018).

El Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos, elaborado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), plantea proyectos piloto de sistemas de recarga y recuperación para el aprovechamiento de agua de lluvia en el Distrito Federal (Ahora CDMX), con el fin de cuantificar y analizar los volúmenes y calidad el agua obtenida por la captación de agua de lluvia en la Ciudad de México (Impluvium, 2014).

Por su parte, la literatura científica se ha centrado ampliamente en los SUDS. Dietz (2007), realizó una revisión sobre la relevancia de algunas investigaciones, evaluando su contexto temporal y las necesidades futuras en la investigación de los SUDS; Fletcher (2015), estudió la evolución histórica de los principios subyacentes en la terminología global de los Sistemas Urbanos de Drenaje (SUD) y provee una serie de recomendaciones para una adopción más clara del término; Elliott & Trowsdale (2007), comparó una serie de modelos de aguas pluviales con relación a las características más relevantes para modelar SUDS. Los modelos en sus distintas versiones tienen la capacidad de configurar y/o simular una amplia gama de SUDS y la tendencia a incorporarlos es cada vez mayor. Sin embargo, aún existen áreas de innovación en el desarrollo de los modelos.

Ciertas investigaciones abordan la combinación óptima de SUDS en la fase de planificación urbana. Z. Li et al., (2018), muestran el contexto de los objetivos e índices aplicables en el diseño, la planificación y la construcción urbana; H. Li, Ding, Ren, Li, & Wang, (2017); Meng, Dąbrowski, Tai, Stead, & Chan, (2019), evalúan e identifican el progreso en la implementación de SUDS en 30 ciudades de China, explican las dificultades al tratar de incorporar los riesgos del cambio climático

en la planeación espacial de los SUDS en áreas determinadas; Xu, Jia, Wang, Mao, & Xu, (2017), desarrollan una nueva metodología para optimizar la gestión del agua pluvial en áreas urbanas; Chang, Lu, Chui, & Hartshorn, (2018), evalúan las perspectivas gubernamentales en materia de SUDS y los esfuerzos realizados para promover políticas formales al respecto.

Mientras que otros investigadores se han enfocado en la determinación de sitios óptimos para la implementación de SUDS y/o proponen funciones multi-objetivo para su identificación. Wang, Sweetapee, Fu, Framani & Butler, presentan un nuevo marco para el apoyo en la toma de decisiones respecto al diseño de SUDS, basado en la resiliencia de los sistemas y en una serie de indicadores que contribuyen en la selección del esquema aplicable; En el mismo sentido, Raei, Reza Alizadeh, Reza Nikoo, & Adamowski, (2019), considera los aspectos físicos, técnicos, económicos y, aquellos relacionados con la gestión de la escorrentía pluvial mientras que simultáneamente toma en cuenta la incertidumbre del proceso y los parámetros del modelo; Xu et al., (2018), proponen un nuevo método de optimización basado en la ley económica del aumento de los costos marginales y la teoría de la elección racional, para el diseño de SUDS; Giacomoni & Joseph, (2017), aplican una optimización multi-objetivo de simulación para la identificación de lugares casi óptimos de cubiertas verdes y pavimentos permeables a una escala de captación en sitio.

## Justificación

La Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP) con una superficie de 2,409.1 km<sup>2</sup>, una tasa de crecimiento media anual de 1.8% y un patrón intensivo de desarrollo industrial y económico, manifiesta un déficit de disponibilidad de recursos hídricos (CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2018). Las tasas actuales de extracción de recursos hídricos exceden la relación entre la descarga y recarga del acuífero, limitando la disponibilidad natural del agua. Este es un problema que se ha visto a lo largo del tiempo y aunado a la variabilidad en los patrones de precipitación, los volúmenes de agua superficial que escurren se pierden por rebose y contaminación al seguir su cauce natural hacia el río Santiago que hoy en día es una importante vialidad urbana que cruza el área urbana de la ZMSLP de sureste a noreste (Guillermo Sigfrido Stevens Vázquez, 2014).

Esta situación acentúa la necesidad de una gestión óptima de los recursos hídricos, con una visión hacia la accesibilidad y sostenibilidad de estos, la cual ha estado sujeta a decisiones político-administrativas sin facultades previstas ni perspectivas planteadas hacia el futuro (Méndez

Hernández, 2017). En este sentido la demanda creciente en utilizar la naturaleza y los procesos naturales para abordar el desequilibrio en los recursos hídricos en áreas urbanas especialmente cuando se observa el riesgo de escasez e inundación pluvial asociada con los cambios climáticos y los procesos de urbanización.

Entre el conjunto de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) utilizadas en la planificación urbana, los SUDS, representan soluciones prometedoras para reducir los efectos negativos de las escorrentías urbanas y aumentar los servicios ecosistémicos en áreas urbanas. En esta investigación se plantea un análisis de factibilidad de implementación de SUDS en el área urbana de la ZMSLP, con el objetivo de dar solución a los problemas de escasez presentes y proponer una gestión de los recursos hídricos más adecuada.

## Hipótesis y Objetivos

### Hipótesis

La implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí son la solución complementaria a los problemas de gestión del agua urbana.

### Objetivo General

Analizar la factibilidad de implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí mediante un balance hídrico volumétrico y un enfoque multiobjetivo como una herramienta para la gestión y aprovechamiento del agua de lluvia.

### Objetivos Específicos

1. Proponer un modelo para determinar la combinación óptima de SUDS en la ZMSLP mediante un Balance hídrico Volumétrico.
2. Evaluar los SUDS en diferentes escenarios para cada una de las cuencas propuestas de la ZMSLP.
3. Establecer un enfoque multiobjetivo que considere costos de SUDS y objetivos hidrológicos para encontrar la solución óptima para la ZMSLP.
4. Determinar el valor total de implementación de SUDS en la ZMSLP mediante una propuesta de costos unitarios.

## 1. Situación actual de los recursos hídricos en un contexto urbano

Actualmente la mayoría de la población mundial (4.2 mil millones) vive en áreas urbanas. Se estima que para 2030 la población ascienda a 8.6 mil millones y 9.8 mil millones en 2050. En el año de 2018 se estimó que 3.2 mil millones de habitantes urbanos vivían en las áreas menos desarrolladas frente a mil millones en las más desarrolladas, y la proporción continuará aumentando conforme se produzca la gran mayoría del crecimiento poblacional urbano en las áreas menos desarrolladas a nivel global (WWAP, 2020).

A medida que las tendencias demográficas continúen, la presión sobre los recursos hídricos se irá exacerbando cada vez más debido al aumento de la demanda (agua potable, producción alimentaria y energética), y a los impactos del cambio climático. Pese a que los centros urbanos son considerados como centros de desarrollo e innovación, están marcados por un desequilibrio en áreas relacionadas a la salud, al agua, al saneamiento y a las oportunidades económicas. Un indicativo de ello es la falta de infraestructura de suministro de agua potable e instalaciones de tratamiento de aguas residuales. Deficiencias que frecuentemente tienen repercusiones en la disponibilidad de agua en calidad y cantidad, lo que aumenta el riesgo a la salud poblacional.

Es en las ciudades donde las amenazas e impactos del cambio climático se sienten con mayor intensidad en los sistemas de agua. En los que se incluye temperaturas altas, sequías más severas, precipitaciones atípicas y, mayor frecuencia de lluvias torrenciales; es precisamente esto lo que dificulta una buena planeación del espacio urbano para la provisión de servicios a la población. Relacionado a esto, es importante comprender que las amenazas para la disponibilidad de los recursos hídricos serán más significativas a corto plazo debido al rápido desarrollo de áreas urbanas, mientras que el impacto de la variabilidad en los patrones climáticos se verá a un plazo más largo (WWAP, 2020).

Un gran número de ciudades han experimentado una serie de problemas relacionados con los recursos hídricos, y que, sin un enfoque más sistemático de la gestión del agua, las estrategias propuestas en el pasado se volverán insuficientes e ineficientes [3]. La afectación hacia los recursos hídricos, la disminución de los servicios, el impacto indirecto a la salud y al medio ambiente serán la respuesta para el entendimiento del desarrollo urbano, y fungirán como una clave fundamental para el establecimiento de enfoques eficientes en su sentido más extenso.

La mayoría de los factores que influyen en los procesos de urbanización actualmente no son del todo entendidos por la comunidad del agua, esto dado a que la combinación de estos factores ejerce una gran influencia sobre los recursos hídricos. Además, frente a la incertidumbre de la disponibilidad del agua será necesaria una planificación desde diferentes enfoques, en lugar de adoptar un enfoque fijo y rígido(WWAP, 2020).

Mediante la integración de las partes y sectores interesados en el área urbana, se tiene que asegurar que el entendimiento de los factores sea de tal modo que se puedan tomar decisiones importantes y acordes al contexto urbano que se vive, su adaptación tendrá que ser diversificada y, se tiene que ir más allá de los enfoques lineales, centrados únicamente en la prestación de servicios mientras se busca una minimización de costos. Es requerido un análisis más amplio sobre la situación de los recursos hídricos urbanos y de sistemas enfocados a la sostenibilidad.

### 1.1. Recursos Hídricos en el Mundo

La demanda mundial de recursos hídricos, influenciada por el crecimiento poblacional, la urbanización y la evolución de los patrones de consumo, ha ido en aumento a un ritmo promedio anual del 1%. Esto indica que el uso sustancial de – y el mal uso de – recursos hídricos genera un mayor impacto sobre la sostenibilidad de estos. Si la tendencia continua para el año 2050 se tendrá un aumento del 20 al 30% sobre el nivel actual del uso, el cual será atribuido al sector industrial y al doméstico principalmente en países en vías de desarrollo (WWAP, 2019).

Los escenarios actuales del cambio climático asientan que las variaciones espaciotemporales de la dinámica del ciclo hidrológico agravan el desequilibrio entre el suministro y la demanda de recursos hídricos a nivel global. Estimaciones actuales demuestran que más de 3,000 millones de personas viven en regiones que experimentan niveles altos de estrés hídrico físico por lo menos un mes al año. No obstante, el promedio mundial es tan solo del 11%, 31 países experimentan estrés hídrico entre el 25% (umbral mínimo) y el 70%, y 22 países por encima del 70%, por consiguiente, están bajo un estrés hídrico severo (WWAP, 2018).

Los niveles de estrés hídrico físico eventualmente seguirán en aumento, incluyendo una serie de aspectos importantes a destacar: En primer lugar, teniendo en cuenta que la disponibilidad de agua es variable a lo largo del año, las cifras promedio no muestran un déficit en la disponibilidad



de una temporada a otra. En segundo lugar, el promedio de las cifras suele ocultar las diferencias significantes de la disponibilidad de agua a nivel regional y local. Por último, el estrés hídrico físico no considera las limitaciones económicas del acceso al agua, donde las posibles restricciones no son consecuencia de la cantidad disponible de los recursos hídricos en sí, sino por la falta de servicios de suministro y saneamiento (WWAP, 2019).

Las estimaciones referentes a la calidad de los recursos hídricos indican su deterioro en las próximas décadas, intrínsecamente la disponibilidad de agua se encuentra ligada a la calidad, ya que la contaminación de las fuentes de agua puede excluir diferentes usos, lo que no sólo afecta al bienestar económico y social, sino también a la sostenibilidad de los flujos ambientales vitales, los ecosistemas y la biodiversidad (WWAP, 2017). Pese a la regulación y grandes inversiones hacia la reducción de la contaminación del agua en países desarrollados, los desafíos permanecen como resultado de una regularización deficiente de las fuentes difusas de contaminación; donde el desarrollo económico por sí solo no es una solución a esta problemática.

El desarrollo urbano es una importante fuente de contaminación tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo, particularmente en aguas subterráneas, a consecuencia del mal manejo en la eliminación de residuos sólidos e infraestructura de saneamiento mal gestionada. Inclusive en sistemas de saneamiento gestionados de forma adecuada, los efectos del cambio climático pueden alterar indirectamente los riesgos de contaminación en temporadas de sequía por el cambio a saneamiento *in situ* no protegido, es de esperarse que la mayor exposición a contaminantes se dé en países de bajo y medio ingreso, especialmente por el incremento urbano e industrial, y a la falta de una gestión adecuada del agua residual (WWAP, 2017).

Los patrones variables en la disponibilidad de agua son acompañados normalmente por los cambios proyectados en los riesgos de inundación y sequías. Lo alarmante en este sentido es que el creciente riesgo de inundación suceda en áreas que presentan escasez de agua, y en áreas donde las estrategias locales en contra de eventos climáticos extremos no son las adecuadas y/o sean nulas. En las últimas dos décadas ha habido un incremento de más del 50% en eventos de inundación y de lluvia extrema alrededor del mundo, donde el 43% del total de los desastres naturales es atribuido a inundaciones y el 5% del total es referente a las sequías.

Estos porcentajes contribuyen a grandes pérdidas económicas. Las inundaciones en conjunto con las sequías y las tormentas han afectado aproximadamente a 4 millones de personas y han

causado daños por un valor de hasta 1.3 billones de dólares, lo cual corresponde al 63% del total mundial de los desastres relacionados al agua (WWAP, 2020).

## 1.2. Recursos hídricos en áreas urbanas de México

México es el décimo país más poblado del mundo con aproximadamente 126.2 millones de personas; la tasa anual de crecimiento poblacional es de 1.4 %; y el 75% de la población se concentra en áreas urbanas (FCCyT (Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC), 2012). Los procesos de concentración demográfica en áreas urbanas han acelerado su crecimiento, implicando fuertes presiones sobre los recursos hídricos, dado el incremento de la demanda de servicios. En 2017 se estimó que el 40.63% (50.18 millones de habitantes) de la población del país se concentraba en las 15 zonas metropolitanas con una población mayor a un millón de habitantes.

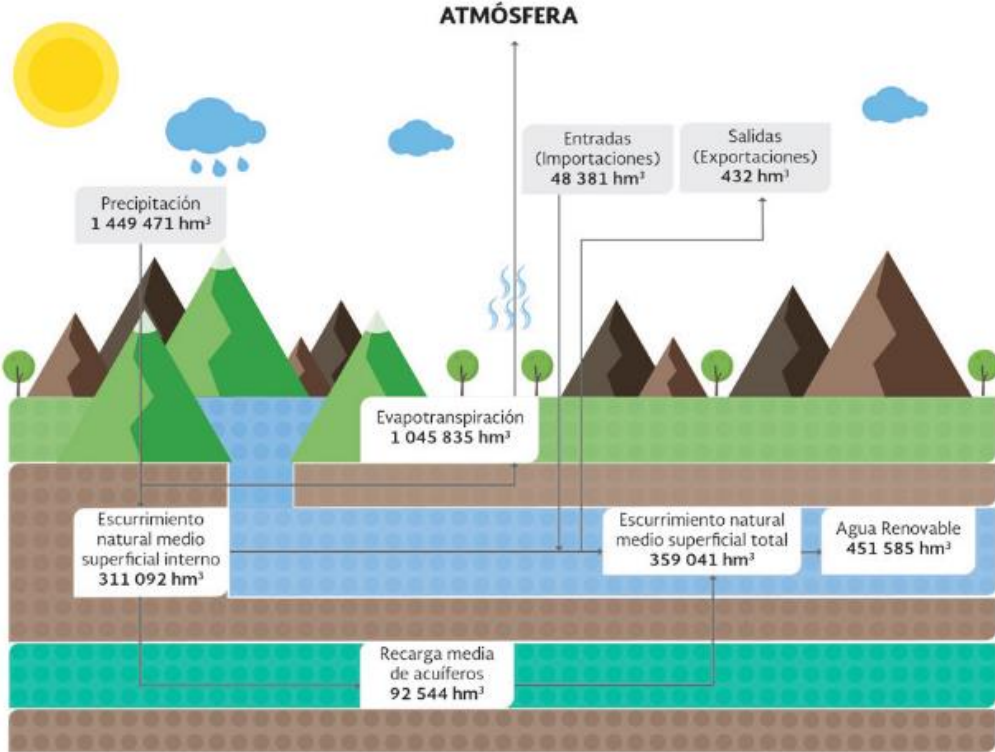
La Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México, desempeña sus funciones por medio de 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA), consideradas unidades básicas para la gestión de los recursos hídricos del país. Las cuencas son unidades naturales de terreno, definidas por la existencia de una división de las aguas superficiales debida a la conformación del relieve. Con el propósito de la administración de la disponibilidad de las aguas nacionales, la CONAGUA definió 757 cuencas hidrológicas al 7 de julio del 2016 junto con su disponibilidad, conforme a la norma NOM-011-CONAGUA-2000, de las cuales 649 se encontraban en situación de disponibilidad (CONAGUA, 2018).

Las cuencas del país se organizan en 37 regiones hidrológicas, y para efectos de administración se agrupan en 13 RHA. En lo referente a las aguas subterráneas, el país se divide en 653 acuíferos. La denominación de acuífero se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre del 2001. Las delimitaciones geográficas se publicaron entre 2003-2009 mientras que la publicación de las disponibilidades y sus actualizaciones se han llevado a cabo periódicamente desde el 2003 a hasta la fecha.

La población, el agua renovable (AR) y el producto interno bruto (PIB) presentan variaciones significativas a nivel país. Al agrupar las RHA V. Pacífico Sur, X. Golfo Centro, XI. Frontera Sur, y XII. Península de Yucatán, concentradas en el sureste del país, se puede contrastar con las regiones restantes. Estas regiones representan dos terceras partes del AR en el país, con una quinta parte de

la población que aporta la quinta parte del PIB nacional. Las RHA restantes cuentan con una tercera parte del agua renovable del país, cuatro quintas partes de la población y de la aportación regional al PIB nacional. El AR per cápita disponible en las regiones del sur es siete veces mayor que la disponible en las RHA de México (CONAGUA, 2018).

Cada año en México se reciben aproximadamente 1,444,971 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. Del total de la precipitación, se estima que el 70% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos y arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Considerando las exportaciones e importaciones fronterizas, el país anualmente cuenta con 451,585 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (Figura 1) (CONAGUA, 2018).



**Figura 1.** Valores promedio anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017.  
Fuente: (CONAGUA, 2018)

Las importaciones representan el volumen de agua que escurre hacia México, generando en las cuencas trasfronterizas que comparte con países vecinos (EE. UU., Guatemala y Belice). Por otro

lado, las exportaciones representan el volumen de agua que el país tiene que entregar a EE. UU. haciendo referencia al Tratado de Aguas de 1944.

El agua es empleada de diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. México, a través del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), clasifica los usos de agua en dos categorías principales, el uso consuntivo, referido al consumo de agua por rubro, y el uso no consuntivo, que involucra el uso del agua para la producción energética. Es importante mencionar que en 2014 se adicionó un rubro no consuntivo, la conservación ecológica, con un volumen concesionado de 9.46 millones de metros cúbicos al año.

El informe de la CONAGUA: “Estadísticas del Agua en México 2018”, muestra los volúmenes totales concesionados en 2017 para usos consuntivos y no consuntivos, los cuales equivalen a 87,842 Mm<sup>3</sup> y a 183,066 Mm<sup>3</sup> respectivamente y se distribuyen en usos agrupados de la siguiente manera en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Agrupación de usos de la clasificación REPGA. Fuente: (CONAGUA, 2018)

<b>Usos agrupados</b>	<b>Volumen total (Miles de Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porcentaje de extracción (%)</b>
<b>Uso consuntivo</b>		
Agrícola	66,799	76.0
Abastecimiento Público	12,628	14.4
Industria autoabastecida	4,267	4.9
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	4,147	4.7
<b>Subtotal consuntivo</b>	<b>87,842</b>	<b>100</b>
<b>Uso no consuntivo</b>		
Hidro eléctricas	183,066	
Conservación Ecológica	9.46	
<b>Subtotal no consuntivo</b>	<b>183,075</b>	
<b>Total</b>	<b>270,917</b>	

En lo referente al grado de presión sobre los recursos hídricos la situación no es favorable, debido a que el porcentaje que representan los usos consuntivos frente al AR es indicativo de la presión ejercida sobre el agua en el país, cuenca o región. Es considerado que, si el porcentaje se encuentra entre el 40% y 100%, se ejerce un grado de presión alto, y cuando es mayor al 100%, muy

alto. A nivel nacional, el país experimenta un grado de presión del 19.5%, que es un nivel bajo; sin embargo, el porcentaje no representa la realidad, ya que la zona centro, norte y noroeste del país experimentan un alto grado de presión con valores mayores al 80%.

### 1.3. Recursos hídricos en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP)

La ZMSLP con una superficie de 2,409.1 km<sup>2</sup>, una tasa de crecimiento media anual de 1.8%, una densidad media urbana (DMU) de 105.6 hab/ha, presenta un patrón intensivo de desarrollo industrial y económico (SEDATU, CONAPO, & INEGI, 2015). Los usos consuntivos agrupados en la ZMSLP están distribuidos de la siguiente manera (**Tabla 3**).

**Tabla 3.** Distribución de usos consuntivos en la ZMSLP. Fuente: (CONAGUA, 2018)

Usos Consuntivos Agrupados	Volumen en la ZMSLP (Mm <sup>3</sup> /año)	Porcentaje (%)
Agrícola	249	19.0%
Abastecimiento público	94	14.8%
Industria autoabastecida	15.0	42.8%
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	0	0.0%
<b>Total</b>	<b>358</b>	<b>17.8%</b>

El Organismo Intermunicipal Metropolitano de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento y Servicios Conexos de los municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez (INTERAPAS) es el organismo operador encargado de gestionar y administrar el recurso hídrico y prestar servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a 372,868 usuarios (domésticos, públicos, industriales y comerciales), lo que equivale a 1,191,000 de los habitantes de los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano de Sánchez y Cerro de San Pedro, del Estado de San Luis Potosí, México.

La extracción de agua subterránea en 2018 tuvo en operación 85 pozos en San Luis Potosí, 27 en Soledad de Graciano Sánchez y 2 en Cerro de San Pedro, para un total de 114 fuentes de abastecimiento subterráneo en la ZMSLP, las cuales aportan un volumen de extracción de 79,759,750 Mm<sup>3</sup> que se traducen en un gasto promedio de 2,529 l/s.

La ZMSLP está ubicada al interior de una cuenca endorreica perteneciente a la Región Hidrológica #37 "EL Salado". Las precipitaciones pluviales escurren hacia el interior de la cuenca formando corrientes intermitentes, mientras que una parte se infiltra al subsuelo. Como en otras cuencas con las mismas características semiáridas del norte del país, los escurrimientos de la cuenca del área urbana de la ZMSLP se caracterizan por ser efímeros, intermitentes y torrenciales; lo que quiere decir que el caudal de las escorrentías pluviales crece de manera considerable durante la temporada de lluvias, mientras que en otras épocas sus lechos permanecen con poca agua.

Los escurrimientos procedentes de las sierras situadas al oeste y suroriente de la ZMSLP forman el Río Santiago, considerado como el colector principal de la cuenca. Debido a las condiciones de aridez y precipitación, las fuentes de agua superficial representan aproximadamente el 8% del abastecimiento total en la ZMSLP. Según los datos del INTERAPAS en el informe del 2018, el nivel de almacenamiento de agua superficial en presas se distribuye porcentualmente en: Presa San José con 3.896 Mm<sup>3</sup> al 79.4%; presa El Potosino con 2.456 Mm<sup>3</sup> al 74.6% y presa El Peaje con 1.777 Mm<sup>3</sup> al 26.6%; con una disponibilidad total de agua almacenada que asciende a los 8.129 Mm<sup>3</sup>, sin embargo, el desarrollo y crecimiento de la ZMSLP depende en su mayoría de agua subterránea (92%).

El acuífero de San Luis Potosí es la fuente de abastecimiento de más del 60% de la población del estado. De él dependen la conurbación de seis unidades administrativas, San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Cerro de San Pedro, Mexquitic de Carmona y Villa de Zaragoza. Las tasas actuales de extracción de recursos hídricos excede la relación entre la descarga y recarga del acuífero, limitando la disponibilidad natural del agua (Estrada-Pérez, 2013), sumado a la existencia de una infraestructura de suministro y captación deficiente. Situación que acentúa la necesidad de una gestión integral de los recursos hídricos en el área urbana de la ZMSLP.

En la actualidad, una parte de los cauces de los Ríos Santiago y Españita han sido asfaltados; el cambio de uso de suelo ha modificado la dinámica de captación e infiltración de agua. Una porción del parteaguas poniente de la cuenca sobre la sierra de San Miguelito ha sido impermeabilizada por la industria inmobiliaria, lo que no solamente impide la recarga del acuífero colgado, sino que también aumenta la velocidad y la contaminación de los escurrimientos, e implica la generación de inundaciones en temporadas de lluvia (Jacobo-Marín, 2013).

Los altos grados de presión y el aumento de la contaminación del agua en el área urbana de la ZMSLP son atribuidos a los sectores urbano, doméstico, de industria autoabastecida y al sector

agrícola. Por su parte el sector urbano representa el más alto consumo de agua potable, y que si bien a nivel nacional la agricultura es el sector con mayor consumo de agua, en el caso del acuífero del Valle de San Luis Potosí el uso de agua cíclica en la agricultura posiciona al consumo urbano como el mayor exportador de agua subterránea, demandando un volumen constante y abasto permanente (López-Álvarez, 2012).

El abastecimiento doméstico solo puede realizarse con agua del acuífero profundo, debido a que, como se mencionó, la calidad del agua del acuífero superficial no cumple con los estándares de consumo (Guillermo Sigifrido Stevens Vázquez, 2012). No obstante, las perforaciones cada vez más profundas del acuífero tienen como consecuencia una contaminación geoquímica, principalmente por la presencia de flúor. Se ha identificado que este compuesto ha rebasado los límites establecidos por la **NOM-127-SSA1-1994** lo que tiene efectos perjudiciales en la salud de la población.

En el sector urbano se presenta otro problema directamente relacionado con la calidad y cantidad de agua: la desigualdad social, pues mientras existen zonas con abundante agua, p.ej. la zona Huasteca, las condiciones económicas no permiten el acceso a infraestructura de distribución y saneamiento de agua, caso contrario al área urbana de la ZMSLP donde se genera el 79% del PIB; donde existe infraestructura y servicios de saneamiento, pero no hay agua suficiente para la población.

Según CONAGUA el acceso a los servicios de agua entubada en zonas urbanas y rurales para el 2015 fue de 97.8% y 87.0% respectivamente, en el caso del agua entubada en vivienda o predio se tiene un 94.4% y 85.0% respectivamente. En cuanto a los servicios de drenaje y saneamiento se tiene una cobertura urbana y rural de 97.4% y 77.5% respectivamente y en drenaje a red pública o fosa séptica porcentajes de 96.6% para urbano y 74.2% para rural (CONAGUA, 2018).

Si las condiciones socioeconómicas de la población no son las adecuadas, tal región no tendrá un acceso a fuentes mejoradas de agua. De hecho, la desigualdad en el consumo es visible incluso dentro de la ciudad, pues, aunque el promedio de consumo de agua en la ciudad es de 162 l/hab/día, el volumen consumido en las zonas residenciales asciende hasta 370 l/hab/día, frente a 120 l/hab/día en las zonas populares (Guillermo Sigifrido Stevens Vázquez, 2012).

## 2. Servicios de regulación y gestión de la escorrentía urbana

El conocimiento de que no todos los problemas relacionados con los recursos hídricos se pueden prevenir, es la base de los cambios actuales en la gestión del agua, el cual tiene como objetivo minimizar los impactos en los sistemas urbanos (Pappalardo et al., 2017). En la actualidad las investigaciones se han enfocado en el concepto de resiliencia urbana como un nuevo modelo, en donde se integra la problemática del agua con la planeación urbana y la gestión de desastres. Bajo la premisa de que las ciudades son sistemas socio-ecológicos, identificadas como ecosistemas que dan soporte a la resiliencia urbana por medio del suministro de una variedad de servicios de provisión, regulación y servicios socio-culturales (Carabine, Venton, Tanner, & Bahadur, 2015).

Los servicios de regulación de los recursos hídricos son considerados como servicios cruciales en contextos urbanos. Su importancia y funcionalidad es notable en la provisión de servicios ecosistémicos y en los múltiples valores de resiliencia urbana aportados, incluyendo los servicios de regulación de escorrentía pluvial. Normalmente estos servicios son evaluados a través de índices e indicadores, tales como: el potencial de infiltración y el porcentaje de superficie impermeable y, a su vez, son también funcionales en la valoración económica de los servicios.

Los valores económicos de regulación de la escorrentía pluvial provienen de los costos asociados a la prevención de daños a la infraestructura urbana, al medio natural y a la dependencia de tecnologías de tratamiento y purificación del agua. La sustitución de infraestructura urbana por infraestructura sostenible a falta de servicios de regulación de agua en las áreas urbanas también representa costos adicionales para la sociedad (Anderson, Okereke, Rudd, & Parnell, 2013). Es entonces necesario que, en la aplicación de servicios de regulación y gestión de agua, se desarrollen indicadores más apropiados para la cuantificación de los procesos mediante los cuales se regulan los flujos de agua en la cuenca urbana. Se requieren modelos hidrológicos e hidráulicos más específicos que funcionen como herramientas para el cálculo de indicadores en la cuantificación de los servicios ecosistémicos que ofrecen los recursos hídricos dentro de un sistema urbano (Pappalardo et al., 2017).

En este sentido, la simulación y evaluación de las posibles respuestas de la cuenca urbana ante las posibles modificaciones de su entorno se vuelve fundamental en la identificación de estrategias más efectivas. Las cuencas hidrológicas son la escala más adecuada para el análisis de los flujos de



agua en un área urbana, siendo identificadas como las características espaciales sobre las cuales se implementarán las estrategias de gestión de los escurrimientos pluviales.

## 2.1. Sistemas de drenaje pluvial urbano

En áreas urbanas es necesario el desalojo del agua de lluvia de tal forma que la población y los distintos componentes urbanos no corran ningún riesgo de afectación. Sin embargo, los procesos de urbanización modifican el entorno natural y alteran el flujo original del ciclo hidrológico (Zhou, 2014). Los volúmenes de agua superficial aumentan debido a la poca permeabilidad que adquiere la superficie del suelo al modificarse. Esto obliga a que el diseño de sistemas artificiales de drenaje cuente con una capacidad mayor a la que tenían las corrientes de agua originalmente (CONAGUA, 2016a).

Los sistemas de drenaje pluvial son una red de conductos e instalaciones complementarias que permiten la captación y el transporte del agua de lluvia fuera del área urbana lo más rápido posible. Su planificación y diseño considera ciertos parámetros a partir de los cuales se esperan resultados (Tabla 4).

**Tabla 4.** Parámetros clave en el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano y los resultados esperados. Adaptado de:(CONAGUA, 2016a)

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado esperado</b>
<b>Eficacia del drenaje</b>	Capacidad de evitar inundaciones o encharcamientos que puede ser foco de infecciones y generar fauna nociva; minimizar las afectaciones a los habitantes y a la infraestructura urbana ante la ocurrencia de tormentas.
<b>Control de inundaciones</b>	Protección a las vías de comunicación ante inundaciones y desalojo del agua ocasionada por la precipitación de diseño determinada.
<b>Volumen de escurrimiento</b>	Control del escurrimiento; capacidad para captar el agua generada por la precipitación de diseño; resistencia a la erosión provocada por el flujo; y garantizar que la descarga de agua no cause afectaciones a las áreas aledañas, al ecosistema o a los cuerpos receptores.
<b>Descarga máxima</b>	Evitar conflictos legales entre organismos y comunidades aledañas (aguas abajo); la descarga debe ser tal, que prevenga la erosión de cuerpos receptores.
<b>Velocidad de flujo</b>	Garantizar el control de inundaciones en cuerpos de agua y áreas aledañas; la seguridad de tránsito para peatones y vehículos.

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado esperado</b>
<b>Profundidad de flujo</b>	Priorización del control de inundaciones.
<b>Estética</b>	El sistema debe ser acorde al paisaje urbano; y procurar la protección de los sistemas naturales de drenaje.
<b>Infraestructura y costo de mantenimiento</b>	El desarrollo de un sistema de drenaje debe generar un costo asequible al organismo operador, debe ser tal que los requisitos de operación y mantenimiento permitan la sostenibilidad; debe de ser estructuralmente resistente ante las inundaciones que superen su capacidad.

De esta forma, deben considerarse los niveles de superficie libre de agua en los cauces a los que se descargarán los sistemas de drenaje pluvial, relacionados a los periodos de retorno de diseño para la protección de la población. Entre los aspectos más importantes en el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano, se encuentra la reducción de los cambios al régimen de flujo natural del agua en la cuenca; al reducir al mínimo los cambios se pueden alcanzar una serie de beneficios, tales como (CONAGUA, 2016a):

- Menor arrastre de contaminantes
- Menor riesgo de inundación aguas abajo
- Menor riesgo de erosión de los cuerpos receptores
- Menor costo en la operación y mantenimiento de la infraestructura pluvial

El diseño de sistemas de drenaje pluvial tiene que considerar los costos asociados con las inundaciones, pues estos pueden incluir la reconstrucción y la rehabilitación de los equipos dañados, el impacto sobre la economía local, el cierre de los centros de trabajo y el gasto del Estado y de fondos federales para la atención de desastres.

La proyección de sistemas de drenaje urbano se tiene que diseñar conforme a ciertos aspectos de seguridad: el impacto a un “nivel local” aceptable para la comunidad ante la ocurrencia de una precipitación de diseño; el efecto potencial sobre la comunidad en términos de recuperación; la preservación de la integridad de los sistemas de drenaje, naturales y artificiales. El uso de suelo, las condiciones climáticas y el tipo de precipitación son distintos de un lugar a otro, lo que sugiere que las posibles soluciones deben ser acoplables a estas condiciones (CONAGUA, 2016a).

El mantenimiento de las tasas de infiltración natural del agua de lluvia en los suelos de captación beneficia principalmente al ecosistema, manteniendo los flujos de aguas subterráneas

naturales. Así, el diseño del sistema de drenaje pluvial en un área urbana debe simular las condiciones originales del suelo previo al desarrollo y sus tasas de infiltración naturales.

## 2.2. Ciclo hidrológico urbano

El ciclo hidrológico se puede definir a través de un concepto descriptivo adaptable al proceso que sigue el agua sobre los ecosistemas, desde su paso por la atmósfera hacia la tierra y su retorno a la atmósfera: evaporación y evapotranspiración, precipitación, infiltración y reevaporación; involucra el transporte cíclico e indefinido. Su movimiento es impulsado por los flujos de energía térmica y por la fuerza gravitacional de la tierra; un ejemplo de esto es el calor latente generado por la evaporación, ejerciendo un efecto de enfriamiento y es base para el entendimiento de las soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para la regulación de climas urbanos (WWAP, 2018).

Las características propias de los ecosistemas afectan a todas las rutas hidrológicas en el ciclo del agua (**Figura 2**).

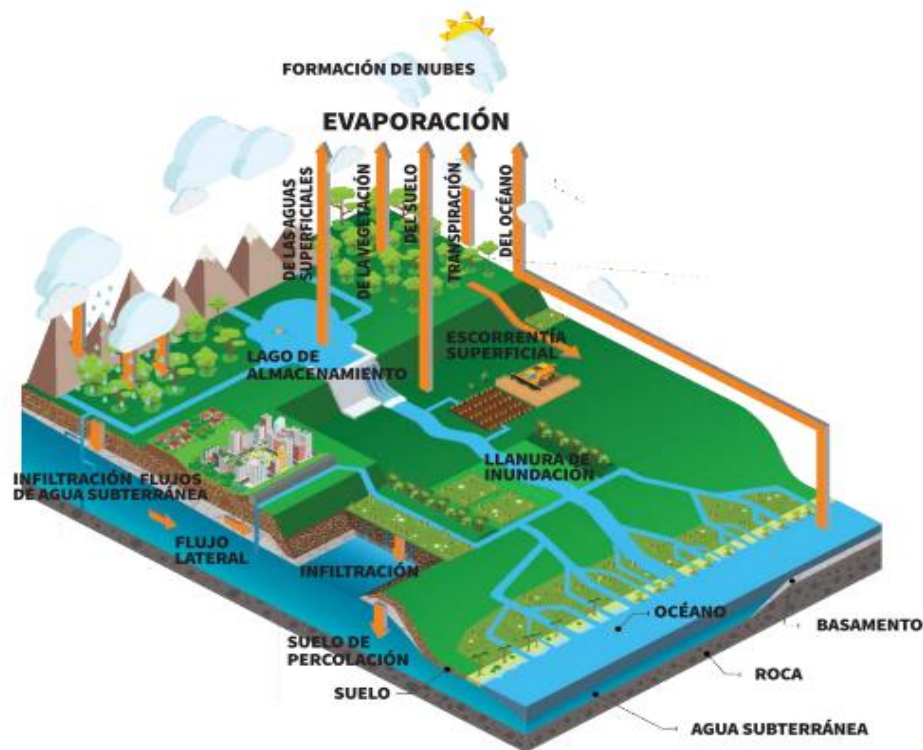
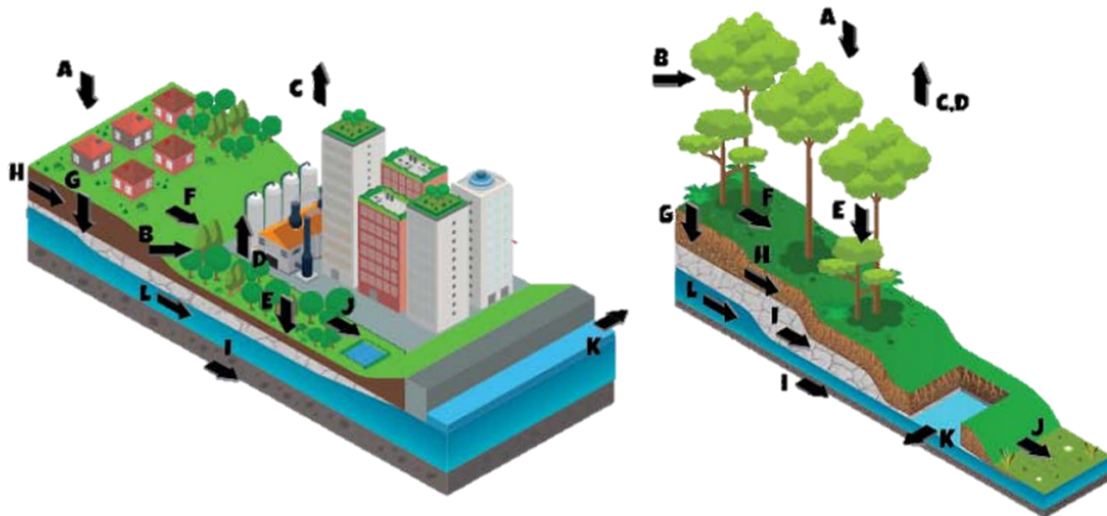


Figura 2. Rutas hidrológicas generalizadas del ciclo del agua. Fuente: (WWAP, 2018).

Los procesos ecológicos involucrados en un ecosistema, especialmente en los suelos, influyen en la calidad del agua a medida que se transporta a través de, en la formación del suelo, la erosión, el transporte y en el depósito de sedimentos, teniendo una gran influencia en la hidrología del sitio. En consecuencia, las estrategias de planificación y gestión del uso de suelo consideran cada vez más la capacidad del ecosistema para la regulación de los flujos de agua como la manera más viable de abordar la capacidad de la ciudad para hacer frente a los problemas relacionados con el agua (Pappalardo et al., 2017).

Es importante entender el funcionamiento de las rutas hidrológicas del ciclo del agua para su adaptación frente a los cambios originados por el desarrollo urbano, partiendo de las rutas que desestabilicen los sistemas que dependen de él (Martínez Cuéllar, 2015). La conceptualización tradicional del ciclo hidrológico urbano es de características lineales. Los procesos que suceden responden a secuencias de flujo lineal: precipitación, captación, interceptación, evaporación, distribución, aprovechamiento, saneamiento y descarga (**Figura 3**).



**Figura 3.** Rutas hidrológicas generalizadas en un entorno urbano (Izquierda) y en un entorno natural (Derecha). Fuente: (WWAP, 2018)

Donde: A. Lluvia y/o Nevada; B. Captura de precipitación horizontal; C. Interceptación, evaporación, D. Transpiración; E. Precipitaciones directas y escorrentía cortical; F. Flujo superficial del exceso de infiltración, G. Infiltración; H. Flujo subsuperficial lateral en los estratos del suelo; I. Flujo subsuperficial lateral en roca no consolidada y/o roca sólida; J. Flujo superficial de saturación; K. Flujo del río (o flujo del canal); L. Flujo de agua subterránea lateral.

Es importante considerar cada uno de los pasos del ciclo hidrológico original e incluirlos en el establecimiento de infraestructura hidráulica urbana para que no sean limitados. Normalmente en

las ciudades el agua que ingresa se contamina, la infiltración se reduce y la velocidad de los escurrimientos pluviales aumentan.

Los modelos que sigue el ciclo hidrológico urbano son los de un sistema global en el que se considera el manejo del agua a través de infraestructura hidráulica de captación y conducción. Los cauces naturales son canalizados y los sistemas de drenaje urbano son diseñados para recibir la mayoría del agua de escorrentía pluvial con la finalidad de disminuir el riesgo de inundación y maximizar la vida útil de las edificaciones. Busca evitar la sobreexplotación de los recursos hídricos disponibles debido a que las prácticas convencionales de drenaje urbano resultan en la pérdida de la riqueza natural de los cuerpos de agua y en la disminución de la capacidad de respuesta ante el aumento del volumen de escorrentía.

### 2.2.1. Consecuencias de la urbanización

Las consecuencias de la modificación o sellado del suelo sobre el principal componente ambiental están referidas a los cambios de las reacciones químicas y a la transferencia de agua, gas, partículas y energía entre el suelo y otros componentes ambientales, lo cual influye en el buen funcionamiento del ciclo hidrológico y de los sistemas naturales involucrados. Entre los impactos relacionados a la urbanización se destacan los siguientes:

#### 2.2.1.1. Impacto en la transferencia de energía

La modificación del suelo debajo de las ciudades modificará a su vez el clima local, lo que provocaría el aumento de la temperatura. La diferenciación climática de la ciudad es más evidente en el aumento de la temperatura del aire cerca del suelo sellado en comparación con la temperatura del aire a las afueras de la ciudad (Scalenghe & Ajmone-Marsan, 2009). Este fenómeno urbano es conocido como isla de calor, y tiene causas adicionales en las características térmicas de los materiales de la superficie y el calor residual generado por las actividades antropogénicas, que también contribuyen al fenómeno.

La mayoría de las superficies urbanas, como carreteras y tejados, tienen una difusión relativamente baja por la reflectividad a la radiación solar. En las ciudades parte de la radiación que es reflejada por sus superficies sale del área urbana y otra parte de ellas es interceptada y parcialmente absorbida por otras superficies urbanas. El resultado de esto es que las ciudades tienden a tener una difusividad de temperatura efectiva menor que a sus alrededores (Sakaguchi, Momose, & Kasubuchi, 2007).

#### 2.2.1.2. Impacto en los sistemas bióticos

El funcionamiento de los ecosistemas urbanos se ve sostenido por las condiciones de sus suelos; el impacto de la modificación del suelo en un medio natural está en función de la composición original del suelo y en la mayoría de los casos resulta en la pérdida de la biodiversidad.

La urbanización es considerada como uno de los factores clave en la homogenización biológica, referida a la pérdida de especies tanto en flora como en fauna. Donde los ecosistemas nativos, son sustituidos por infraestructura urbana y la superficie natural restante se ve revestida con áreas verdes, que normalmente están dominadas por especies ornamentales no nativas (Scalenghe & Ajmone-Marsan, 2009). A su vez, fragmenta grandes áreas, extendiendo su influencia sobre el paisaje y, el efecto de esta fragmentación sucede en todas las escalas espaciales, influyendo a su vez en todos los organismos presentes (Scalenghe & Ajmone-Marsan, 2009).

El tamaño de las áreas naturales vegetadas puede contar con una extensión muy reducida o incluso demasiado aislada para sostener el desarrollo de las especies, y así las inquietudes sobre la biodiversidad en un contexto urbano se puede clasificar en tres grupos principales (Savard, Clergeau, & Mennechez, 2000):

- I. Aquellas relacionadas con el impacto de la ciudad en sí sobre los ecosistemas contiguos;
- II. Los enfocados en la maximización de la biodiversidad dentro de la ciudad y;
- III. Los relacionados al manejo de especies indeseables dentro del ecosistema urbano.

Aunque la diversidad y la abundancia de especies normalmente están relacionadas con la calidad de vida urbana, la sobreabundancia de algunas especies puede resultar indeseable.

### 2.2.1.3. Impacto en el flujo de agua

Los flujos de agua en la superficie del suelo se describen generalmente por la ley de Darcy, que describe el impulso del flujo de agua por el gradiente y la resistencia o conductividad, respectivamente, que controla la permeabilidad, respectivamente. Una serie de factores tienen influencia sobre la conductividad hidráulica y pueden alterar el comportamiento hidrológico tanto el comportamiento mecánico del suelo (Scalenghe & Ajmone-Marsan, 2009).

La principal observación es que la modificación artificial de la superficie del suelo lo hace impermeable al flujo de agua, en conjunto con los impactos térmicos descritos anteriormente, implica que el régimen hídrico del suelo profundo está severamente alterado. La modificación del suelo, principalmente su sellado, tiene consecuencias evidentes también en las áreas aledañas, aumentando la cantidad y la velocidad de la escorrentía que llega a la superficie natural, y a su vez los riesgos de inundación y erosión en áreas sin modificar.

Los riesgos de inundación en áreas urbanas debido a los efectos combinados del crecimiento urbano y los cambios climáticos se han incrementado y, aunque las inundaciones en espacios naturales tienden a abarcar una gran extensión superficial, en áreas urbanas resultan más costosas y difíciles de controlar (Luan et al., 2019). Este aumento afecta negativamente a los sistemas hidrológicos, al entorno urbano y a sus habitantes.

Existe una relación lineal entre el tamaño del área impermeable y la escorrentía anual promedio; el incremento de superficies impermeables duplica el valor de la escorrentía superficial y a su vez, existe una disminución de la evapotranspiración general en los suelos modificados dentro del área urbana. Es importante mencionar que la modificación intensiva de las superficies en áreas urbanas, aumenta la velocidad de la escorrentía y ejerce una gran presión sobre los sistemas de drenaje, además del aumento de los riesgos de inundación puede tener repercusión sobre la calidad del agua, esto debido a la reducción de la capacidad de infiltración de suelo (Bhaduri, Minner, Tatalovich, ASCE, & Harbor, 2001).

## 2.3. Instrumentos de gestión de agua urbana en México

En las últimas décadas en México se ha realizado un profundo proceso de reorganización para gestionar el agua del país a través de dos ejes fundamentales de acción: El primero es el impulso de un marco institucional que favorezca la gestión autónoma y continua de los servicios urbanos de agua y por otro lado el segundo es la generación de incentivos para aumentar la cobertura y mejorar el desempeño de los servicios de suministro, drenaje y saneamiento de agua (Academia Mexicana de Ciencias, 2010).

Esta reestructuración supone la democratización de las estructuras de gestión a través de la apertura a la participación de los usuarios del agua, la sociedad organizada y el sector privado. El resultado ha sido la creación y el refuerzo de las gerencias regionales, los Consejos de Cuenca y sus órganos auxiliares, así como los Organismos de Cuenca (FCCyT (Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC), 2012). Se ha pasado de un modelo de “racionalidad administrativa” centralizado a otro en transición, descentralizado y característico que busca ampliar la participación social y del sector privado denominado como el modelo “mercantil – ambiental” (Aboites-Aguilar, 2010).

En lo que refiere a la línea de acción que se enfoca en la búsqueda de la mejora del desempeño de los servicios de agua, está se ha traducido principalmente en el objetivo de elevar la cobertura y la eficiencia de los servicios urbanos de agua. Esto es, que se ha buscado que los servicios de agua lleguen a una mayor porción de la población, y que los servicios se presten de manera eficiente tanto en su distribución física como en el cobro de los servicios.

### 2.3.1. Instituciones relacionadas con la gestión del agua urbana

La CONAGUA es la autoridad federal para el manejo de los recursos hídricos, es un organismo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) con el objetivo de preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para su administración sostenible y garantizar la seguridad hídrica con la responsabilidad de los órdenes de gobierno y la sociedad en general. Otras instancias en los ámbitos federal, estatal y municipal, así como asociaciones de usuarios, empresas e instituciones del sector privado y social trabajan en conjunto con la CONAGUA.



Constitucionalmente, los municipios tienen la responsabilidad de brindar servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Generalmente lo hacen a través de organismos encargados del manejo del agua. Las condiciones para la participación privada surgen a través de la democratización de la estructura de la gestión de los sistemas de potabilización y saneamiento de agua; en el contexto de una recurrente crisis económica que favorece el sometimiento de la política económica y social a las exigencias impuestas por los organismos financieros internacionales se adquiere la idea de que la participación del sector privado sería la solución para lograr un mejor desempeño y eficiencia en la gestión de los sistemas de agua y saneamiento (Academia Mexicana de Ciencias, 2010).

La inversión privada se ha llevado a cabo tanto en el ámbito de las empresas de agua potable como en las de saneamiento, en general, se conforma al menos de tres formas:

- I. La participación en la gestión integral de sistemas, en donde las empresas privadas, si bien supondría una inversión de capital propio, en realidad tienen acceso a préstamos por parte del Estado.
- II. La participación en la gestión de los sistemas a través de contratos de prestación de servicios parciales. En este caso se concede la responsabilidad de la administración sin inversión de capital y normalmente son contratos de corto plazo.
- III. La participación a través de la construcción, operación y transferencia, mecanismos que se han dado principalmente en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en todo el país.

En lo referente a la intervención de la sociedad y de los usuarios en la gestión del agua surge a través del establecimiento de los Distritos de Riego del país que son proyectos de irrigación desarrollados por el Gobierno Federal y principalmente por medio de la formación de asociaciones de usuarios y después de la constitución de espacios mixtos de Consejos de Cuenca y Comisiones y Comités de Cuenca, así como los Consejos Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS), creados como órganos de coordinación y programación hidráulica de la delimitación territorial que comprende el área geográfica de la cuenca o cuencas hidrológicas en que se forma estos consejos.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN), en la cual se establece que el uso o aprovechamiento de agua de las aguas de la nación se realizará mediante la concesión o asignación otorgada por el Ejecutivo a través de la CONAGUA por medio de los organismos de cuenca; de igual forma, para la descarga de aguas residuales a cuerpos de agua nacionales es fundamental contar con permiso

expedido por la comisión. Los títulos de concesión y asignación, así como los permisos de descarga se inscriben en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA).

El marco institucional de los estados se da a través de Comisiones Estatales de agua e Institutos del Agua en las cuales se inician procesos legislativos para la creación de leyes estatales relacionadas con el agua, dichos procesos son independientes en cada estado y no son simultáneos, esto mismo ocurre en los municipios; sin embargo, todos ellos están orientados al fortalecimiento de las instancias de gestión de los recursos hídricos, surgiendo así los organismos operadores de agua potable y las entidades desconcentradas del municipio o del gobierno estatal (FCCyT (Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC), 2012).

Las responsabilidades que adquieren estos organismos públicos descentralizados son diversas e incluyen:

- Proveer soporte en los procesos saneamiento y agua potable;
- Planificar, asesorar y ejecutar la infraestructura hidráulica en materia de agua potable y saneamiento a nivel local;
- Ampliar los servicios de infraestructura hidráulica para el tratamiento de agua en los centros urbanos;
- Identificación de alternativas para el suministro de agua tanto a corto como a largo plazo;
- Implementación de programas de reutilización y uso sostenible del agua disponible;
- Promover el fortalecimiento del organismo operativo del agua potable.

En este orden de ideas, el municipio confiere la gestión de la distribución de agua potable y saneamiento a un organismo específico que opera el agua potable. En el caso de San Luis Potosí, el organismo operador de agua potable fue el Subfondo de agua potable, alcantarillado y saneamiento de San Luis Potosí (SISAPAS). En el año de 1997, el SISAPAS cambió su nombre a “Entidad intermunicipal de agua potable, alcantarillado y saneamiento de los municipios de Cerro de San Pedro, Soledad de Graciano Sánchez y San Luis Potosí” (INTERAPAS). Dicho organismo tiene las siguientes responsabilidades:

- La gestión del agua en la ZMSLP (distribución y saneamiento).
- Promover entre los ciudadanos de San Luis Potosí, la conciencia para el ahorro, uso racional, reutilización y pago de los servicios de agua potable.

- Operar, conservar y administrar los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento de agua residual.
- Operación de las plantas de tratamiento de agua (PTAR).
- Extracción de agua subterránea de pozos y perforación de nuevos.

En ocasiones, el municipio trabaja con INTERAPAS para la distribución del agua en pipas, específicamente durante la temporada de sequías, durante el mantenimiento del sistema de agua y cuando la disponibilidad de agua es baja. En algunos otros casos, esto ocurre también durante los procesos electorales de los estados o municipios.

### 2.3.2. Políticas de sostenibilidad hídrica en el país

Los conceptos de desarrollo sostenible y de sostenibilidad son incorporados a México en 1996 en las reformas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) de 1987. A partir de la década de 1980, la política ambiental del país adquirió un enfoque integral y se reformó la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) para crear instituciones y establecer las bases jurídicas y administrativas de la política de protección ambiental (Martínez Cuéllar, 2015).

En lo que refiere a los recursos hídricos, el artículo 27 de la CPEUM, establece que la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde a la nación, teniendo el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, contribuyendo a la propiedad. La Ley de Aguas Nacionales (LAN) reglamentaria del mismo artículo, tiene por objeto regular la explotación, uso y aprovechamiento de estas aguas, su distribución y control, así como su preservación en cantidad y calidad para alcanzar un desarrollo integral sostenible.

La legislación nacional incluye a la LGEEPA, la Ley General de Asentamientos Humanos, la Ley General de Bienes Nacionales y La ley de Suelos. México cuenta con tradición arquitectónica que favorece las prácticas y diseños de edificación respetuosos con el medio ambiente y con un reducido impacto ambiental. Sin embargo, en algunas ciudades, gran parte de la escorrentía pluvial fluye sobre superficies impermeables al sistema de drenaje de la ciudad; sólo el 11% se restituye a los acuíferos, lo que ocasiona una gran dependencia de las cuencas vecinas y un riesgo creciente de inundaciones (CCA, 2008).

Las políticas para fomentar la edificación sostenible son relativamente nuevas y, por lo general, se centran en el sector de la vivienda. La Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) ha estado documentando prácticas sostenibles y trabaja en la definición de criterios para viviendas sostenibles. El Instituto del Fondo Nacional de Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT) ha creado un programa de “hipotecas verdes”. El cual aumentará los montos de los créditos disponibles para adquisición y otorgará periodos de financiamiento más extensos para las viviendas que integren elementos con ventaja ambiental.

En la Ciudad de México (CDMX) la ley de aguas promueve y exige la captación de agua de lluvia en nuevas edificaciones (Asamblea Legislativa del Distrito Federal, 2003). El aprovechamiento de agua pluvial como solución a los problemas urbanos también se aprueba en la Ley de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático de la CDMX. Por su parte, la Secretaría del Medio Ambiente de la ciudad cuenta con un programa que certifica a toda infraestructura sostenible para la obtención de apoyos fiscales; y los códigos fiscales y financieros cuentan con artículos referidos a los apoyos existentes para aquellas construcciones que busquen el ahorro de recursos y energía.

La implementación localizada de SCALL dentro de las propias ciudades ofrece oportunidades adicionales para cumplir con múltiples objetivos de gestión del agua. La CDMX considera la generación de normativa en materia de infraestructura sostenible, que resultaría en un aumento de la capacidad de edificación entre 150 y 200%, siempre que apliquen tecnologías eficientes de consumo de energía y agua.

El desarrollo de políticas y regulaciones específicas para SUDS contribuiría a la tendencia de implementación y aceptación, al funcionar como incentivos para el estudio y desarrollo de tecnologías e instrumentos de gestión. Su establecimiento debe estar asociado a las preocupaciones ambientales, infraestructurales y económicas relacionadas con la adaptación al cambio climático y al crecimiento poblacional en áreas urbanas (Schuetze, 2013).

Las medidas tienen que ser dirigidas hacia dos enfoques principales; el primero dirigido a la gestión del agua pluvial y el segundo a la reducción de la presión sobre los recursos hídricos urbanos. Estos enfoques son considerados como el estado de la técnica y las condiciones básicas para el desarrollo sostenible en áreas urbanas en cuanto a recursos hídricos. Las preocupaciones sobre el suministro de agua y el crecimiento poblacional en las ciudades también funcionan como catalizadores para que los encargados de la toma de decisiones consideren la legislación relacionada

con la conservación de los recursos hídricos y la implementación de fuentes alternativas de agua, en donde se incluyen los SUDS

Pese a que las ciudades mexicanas han realizado un gran avance en la reestructuración de los marcos institucionales de los servicios de agua y en la ampliación del acceso a estos servicios, aun así enfrenta retos importantes en la mejora del abastecimiento y suministro de agua a los usuarios (Academia Mexicana de Ciencias, 2010). En la actualidad se presentan grandes pérdidas de agua (eficiencia física) y las irregularidades en el cobro de los servicios (eficiencia comercial) no son del todo aceptables e indudablemente deben mejorarse.

En este sentido, si bien en un principio pareciera que todo se solucionaría con una mayor inversión financiera, en realidad lo más redituable en el aumento de la disponibilidad de agua urbana sería una gestión más eficiente, que mejore las eficiencias tanto físicas como comerciales, optando por nuevas fuentes de suministro y también por una política comercial más eficiente.

#### 2.4. Infraestructura sostenible

El impulso que han generado los reglamentos y programas gubernamentales en países como Canadá, E.E. U.U., Australia y África, ayuda al desarrollo y planeación de infraestructura sostenible, motivados principalmente por la necesidad de ahorrar costos de energía y agua, mejorar las condiciones ambientales y de calidad de vida (CCA, 2008; Hamdan, 2009). El resultado ha sido la creación de nuevos enfoques y la generación de instrumentos para su investigación. Su divulgación ha acelerado el uso y conocimiento de tecnologías sostenibles mediante códigos y proyectos locales que en su mayoría se adoptan como requerimientos para que la infraestructura cuente con un diseño de conformidad con los criterios de sostenibilidad.

Los desafíos y programas de investigación oficiales y no gubernamentales revisten la importancia en el impulso económico y comercial. El desafío de edificación por Ciclo de Vida (LBC, por sus siglas en inglés) de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) tiene la intención de fomentar la innovación en el diseño de infraestructura que se adapte a los objetivos del desarrollo sostenible. Sus metas buscan lograr la sostenibilidad con el establecimiento de una serie de requisitos de desempeño (CCA, 2008):

- Nulo consumo energético neto: la totalidad de las necesidades de energía del edificio se satisfacen anualmente mediante energía renovable *in situ*.
- Nulo consumo de agua neto: la totalidad del consumo de agua de los ocupantes proviene de agua de lluvia captada o agua reutilizada se purifica apropiadamente sin usar sustancias químicas.
- Descarga de agua sostenible: la totalidad del agua de lluvia y de las descargas de agua del edificio se manejan *in situ*.

Otros requisitos de desempeño incluyen selección y uso de materiales, calidad del aire en interiores, limitaciones de transporte y manejo de residuos de manejo especial.

En México, la LAN en lo que se refiere a sostenibilidad, va enfocada al entendimiento del ciclo hidrológico con la planeación y el desarrollo conforme a la disponibilidad de agua. Busca un equilibrio entre los recursos hídricos y el crecimiento urbano, conservando tanto la cantidad como la calidad del agua. Sin embargo, en la mayoría de los centros urbanos la extracción de aguas subterráneas es mayor a la infiltración, la captación de escurrimientos pluviales es mínima y generalmente el saneamiento es deficiente (Martínez Cuéllar, 2015).

Los objetivos de la infraestructura hídrica sostenible van dirigidos a la generación de un entorno más responsable con los recursos hídricos. Su finalidad es favorecer la economía local, aumentar la utilidad y durabilidad de la infraestructura urbana y contribuir en la reducción de los impactos globales sobre los recursos hídricos disponibles. Para conseguir este propósito es necesario replantear el diseño de ciudades, englobando la planeación, construcción, operación y su mantenimiento, a través de tecnologías y estrategias de gestión más adecuadas como lo son los SUDS.

### 3. Sistemas Urbanos de drenaje sostenible hacia una gestión integral de los recursos hídricos urbanos.

El agua de lluvia debe gestionarse para obtener el máximo beneficio, en la actualidad y en el futuro. Es posible integrar la gestión de aguas superficiales en la planificación urbana, proteger el medio ambiente y conservar áreas con buena calidad de vida para futuras generaciones (Woods-Ballard et al., 2015). El ciclo hidrológico sigue una serie de fases sobre la superficie terrestre (ver sección 2.2). Estas fases pueden verse obstruidas por la modificación de las condiciones naturales del suelo debido al desarrollo, se reducen las áreas permeables disponibles para la infiltración y disminuye la evapotranspiración al haber menos vegetación (S. Perales-Momparler, Calcerrada-Romero, Badenes-Catalán, & Beltrán-Pitarch, 2019). Los estudios muestran que, si no hay una modificación en la gestión de la escorrentía pluvial, el diseño y la planificación de áreas urbanas, estos problemas se agravarán.

Las proyecciones del cambio climático muestran la probabilidad que se intensifiquen las lluvias e inundaciones y sean más habituales. Seguir proporcionando una mayor capacidad del drenaje para hacer frente a estos riesgos crecientes es inadmisibles (Woods-Ballard et al., 2015). En el caso de la ZMSLP donde el crecimiento urbano es dinámico se estima que la escasez de recursos hídricos urbanos será más frecuente y la presión sobre el suministro de agua disponible será cada vez mayor (Guillermo Sigfrido Stevens Vázquez, 2014). La necesidad de encontrar alternativas para el aprovechamiento óptimo del agua de lluvia dentro de la ciudad se vuelve fundamental.

#### 3.1. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Los SUDS se pueden definir a manera de elementos integrales de tecnología e infraestructuras destinados a la gestión de la escorrentía superficial en áreas urbanas a través de la captación, filtración, transporte, almacenamiento e infiltración. Hacen frente a una problemática dual, al abordar las necesidades de una población emergente, y los procesos desmedidos de urbanización. Tras los efectos transformantes del ciclo hidrológico a causa de la urbanización, y al incorporar los

principios de sostenibilidad a la práctica convencional de drenaje urbano, se obtiene la conceptualización de un drenaje sostenible.

*“Drenaje Sostenible significa gestionar el agua de lluvia (incluyendo la nieve y otras precipitaciones) con el objeto de: (a) reducir los daños causados por las inundaciones; (b) mejorar la calidad del agua; (c) proteger y mejorar el medio ambiente; d) proteger la salud y la seguridad; y e) asegurar la estabilidad y durabilidad de los sistemas de drenaje”* (Department for Environment Food and Rural Affairs, 2010).

La filosofía de los SUDS se centra en dos principios fundamentales:

- I. La maximización de los beneficios provistos por los recursos hídricos al entorno natural y;
- II. La minimización de los impactos negativos de la escorrentía pluvial en áreas urbanas.

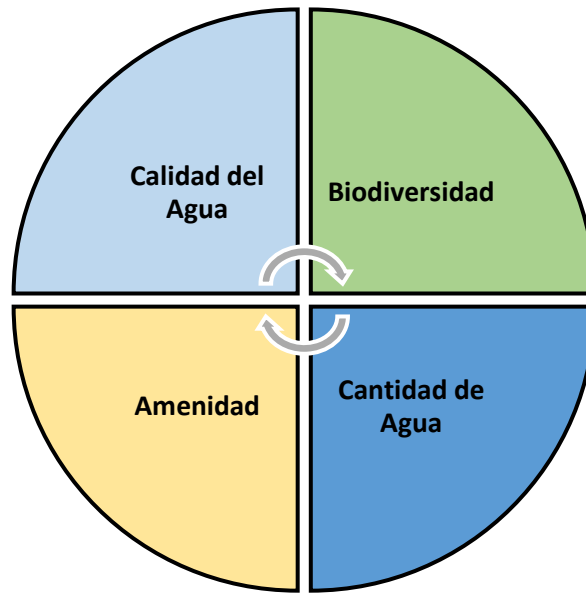
Involucra la gestión de los riesgos de inundación y contaminación de agua en las ciudades a través de la ralentización, almacenamiento, transporte y tratamiento de escorrentía pluvial en el sitio, y de ser posible, en la superficie, así el agua se vuelve un recurso más perceptible en el entorno y posibilita su aprovechamiento (Woods-Ballard et al., 2015).

Los enfoques buscan restaurar, reproducir y preservar los elementos ecológicos del ciclo hidrológico de un sitio previos a su desarrollo al contemplar una variedad de condiciones de flujo, desde eventos de lluvia pequeños a grandes; a través de la configuración secuencial de una serie de componentes SUDS que trabajan en conjunto para formar un tren de gestión (Charlesworth & Booth, 2013).

En su adopción, es posible proporcionar espacios que aporten hábitats para que la vida silvestre prospere dentro de las áreas urbanizadas y generen una conexión más equilibrada entre el entorno construido y el medio natural (CIRIA, 2017), mejorando en gran medida los factores del entorno como la calidad del aire, la regulación de la temperatura en infraestructuras, la reducción del ruido y la provisión de espacios destinados a la recreación y educación.

Hay cuatro categorías principales de beneficios que pueden ser alcanzados mediante el establecimiento de un tren de gestión: cantidad de agua, calidad de agua, amenidad y biodiversidad (AECOM, 2013) (**Figura 4**).





**Figura 4.** Categorías principales en el diseño de SUDS. Adaptado de: (Woods-Ballard et al., 2015).

En general, los objetivos principales del tren de gestión son considerados como los cuatro pilares principales en el diseño de SUDS para su incorporación a desarrollos urbanos y cada uno de ellos contribuye a un sistema de drenaje urbano mejorado y más sostenible (Armitage et al., 2014). Algunos ejemplos de SUDS son: Captación de agua de lluvia, cubiertas verdes, pavimentos permeables, sistemas de biorretención, vegetación (p.ej. árboles, plantas, etc.), cuencas de infiltración, etc.

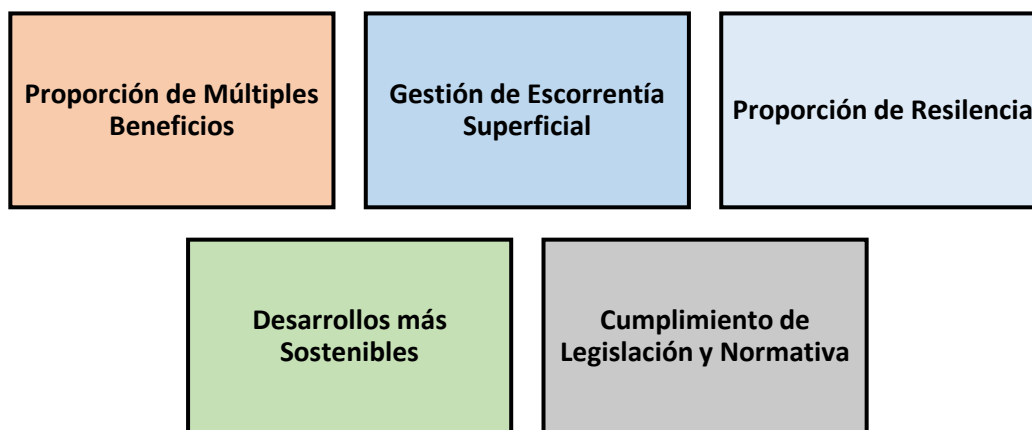
Hay tres claves fundamentales para una implementación exitosa de los sistemas:

- I. Deben considerar la gestión que se le dará a la escorrentía en el sitio de implementación, e incorporarla desde un principio al proceso de diseño urbano.
- II. Agrupar un equipo multidisciplinario al principio del proceso, de tal forma que la planificación urbana, la arquitectura, el diseño del drenaje y los aspectos ambientales sean considerados conjuntamente.
- III. Consultar a las partes interesadas al inicio del proceso, incluyendo a las autoridades locales encargadas de la planificación, regulación ambiental y a los responsables de la aprobación y el mantenimiento de los SUDS.

A demás, su incorporación debería seguir las recomendaciones provistas por los manuales existentes, y considerando los requisitos reglamentarios nacionales o locales aplicables. De manera general su diseño se basa en:

- Utilizar el agua de escorrentía como recurso principal
- Gestionar el agua de lluvia cerca de donde cae y en la superficie
- Permitir que la escorrentía se infiltre
- Promover la evapotranspiración
- Ralentizar y almacenar la escorrentía para simular sus condiciones naturales
- Reducir la contaminación de la escorrentía por medio de la prevención y el control en sitio
- Tratar la escorrentía para reducir el riesgo de contaminación ambiental por contaminantes urbanos.

La aplicabilidad de SUDS es muy extensa en dos sentidos, en primer lugar su incorporación puede darse en nuevos proyectos urbanos y ser adaptados a urbanizaciones ya establecidas (CIRIA, 2017); en segundo la amplitud de sus enfoques puede abarcar cada uno de los objetivos del drenaje sostenible (**Figura 5**). Dependerá de las condiciones del sitio, el tipo de desarrollo urbano planificado y, las características del área circundante; esto a través de la consideración de sus componentes, p.ej. agua superficial, vegetación, usos de suelo, etc.



**Figura 5.** Enfoques de la Filosofía SUDS. Adaptado de:(Woods-Ballard et al., 2015)).

Los SUDS pueden ser aplicados inclusive en áreas urbanas con poca disponibilidad espacial. La aparente carencia de espacio no debe ser una limitante para su diseño y/o implementación, es

importante particularmente en estas áreas para brindar el desarrollo de múltiples funciones ecosistémicas. Algunos de los beneficios proporcionados son (Charlesworth & Booth, 2013):

- La protección a la población y a la infraestructura del creciente riesgo de inundación resultante de la urbanización.
- La protección de la calidad del agua subterránea y superficial de los arrastres de contaminantes
- La protección del régimen del flujo natural (y con esto la morfología asociada a la ecología) en ríos, lagos y corrientes
- Brindar apoyo a hábitats naturales y ecosistemas asociados mediante el fomento de una mayor biodiversidad y con la vinculación de hábitats
- Mejorar la humedad del suelo e intentar reponer los niveles de agua subterránea
- Proveer un suministro de agua disponible para la población
- Crear espacios donde la población quiera vivir, trabajar y jugar a través de la integración de agua y espacios verdes con el espacio construido
- Instruir a la población sobre la gestión y el uso de la escorrentía a nivel local, y los beneficios que provee
- Apoyar la creación de espacios urbanos más resilientes con el cambio climático
- Proporcionar infraestructura rentable que haga un uso menor de recursos naturales y su huella de carbono sea menor a la de las practicas convencionales de drenaje.

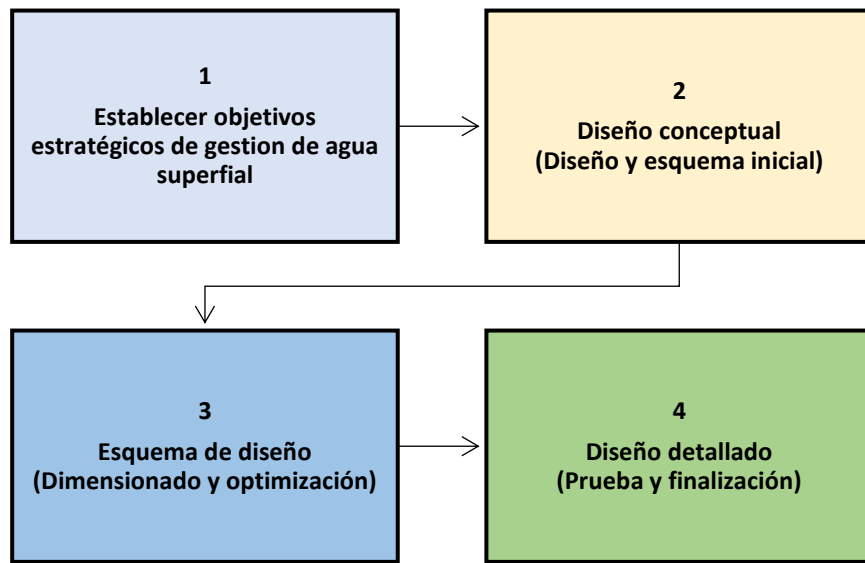
Al aprovechar los sistemas naturales a traes de la implementación de SUDS se hace un mejor uso de los recursos y el gasto energético se reduce; generando asimismo una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los sistemas de drenaje convencional y, al hacer uso de vegetación actúan como sumideros de carbono cuando no están en funcionamiento.

La adopción de un enfoque holístico e integral para la gestión de aguas superficiales como son los SUDS mejora el aprovechamiento de los recursos hídricos y protege al medio natural a un nivel estratégico. Así mismo se contribuye al cumplimiento de los objetivos de la biodiversidad y a la provisión de servicios ecosistémicos a la población urbana en general (Woods-Ballard et al., 2015).

### 3.1.1. Aplicación de los enfoques

La aplicación de SUDS debe iniciar con su diseño en las etapas más factibles de los proyectos de urbanización y, de ser posible, deben considerarse previamente a la obtención de los espacios a desarrollar. Cuando los enfoques son parte de la visión inicial, el carácter y diseño de la urbe, proporcionan una gama de oportunidades: uso de los recursos hídricos para dar forma, y mejorar el espacio, maximizar la funcionalidad, los valores y beneficios del desarrollo (AECOM, 2013).

El proceso de diseño de SUDS por lo general sigue cuatro etapas (**Figura 6**). Los detalles de cada una de las etapas involucradas se describen en la sección 3.1.1.3.



**Figura 6.** Etapas de diseño de SUDS. Adaptado de: (Woods-Ballard et al., 2015))

Las etapas de diseño son parte de un proceso más amplio para el desarrollo en conjunto y, es influenciado por el progreso del proyecto en general. Lo que significa que es fundamental iterar entre etapas, mientras que el desarrollo general y el diseño de infraestructura urbana avanza junto con el diseño de SUDS (CIRIA, 2012). P.ej., existe la posibilidad de tener que revisar el diseño del sistema seleccionado en el diseño conceptual una vez que se haya realizado el dimensionado preliminar de los componentes SUDS y mientras se refina el diseño general del sitio.

#### 3.1.1.1. Incorporación a los procesos de planificación urbana.

La planificación del uso de suelo controla el desarrollo y el uso de la tierra en el interés público a diferentes niveles. Es un sistema que va dirigido por planes, requiere una estructuración anticipada a través de planes de desarrollo y, confiere a las políticas preeminencia en la determinación de solicitudes de permisos de planificación los cuales son necesarios para todo desarrollo (CIRIA, 2012). Los criterios de evaluación pueden establecerse mediante herramientas de planificación adoptadas por las autoridades y a través de estándares incorporados por los organismos de suministro y drenaje locales y, a su vez, pueden estar referidos a los estándares nacionales existentes (Woods-Ballard et al., 2015).

Un plan maestro es un instrumento de planificación general, un diseño espacial que estructura el uso y el desarrollo futuro del terreno (usos de suelo). Tiene un alcance variable, va desde una estrategia de implementación temporal a escala regional/ciudad hasta un plan demostrativo a una escala pequeña; brinda una oportunidad para que los SUDS sean vinculados con otros objetivos de desarrollo y, para demostrar su multifuncionalidad en etapas previas al desarrollo.

La conceptualización del diseño de SUDS en áreas de cualquier extensión de terreno debe formar parte del plan maestro de desarrollo (AECOM, 2013). No obstante, en áreas pequeñas existe la posibilidad de no ser requerida una planeación formal. En ambos casos el diseño debe acoplarse a los procesos de planificación y a los requisitos de las solicitudes de permisos para el desarrollo de nuevas áreas urbanas (Woods-Ballard et al., 2015).

Por su parte, las discusiones previas a la aplicación de solicitudes entre planificadores, consultores y desarrolladores son fundamentales en el proceso de aprobación de la planificación y/o el diseño de los sistemas de drenaje en los sitios de desarrollo. La incorporación e integración de las etapas del proceso de planificación y el diseño de SUDS se muestra en la **Figura 7**.

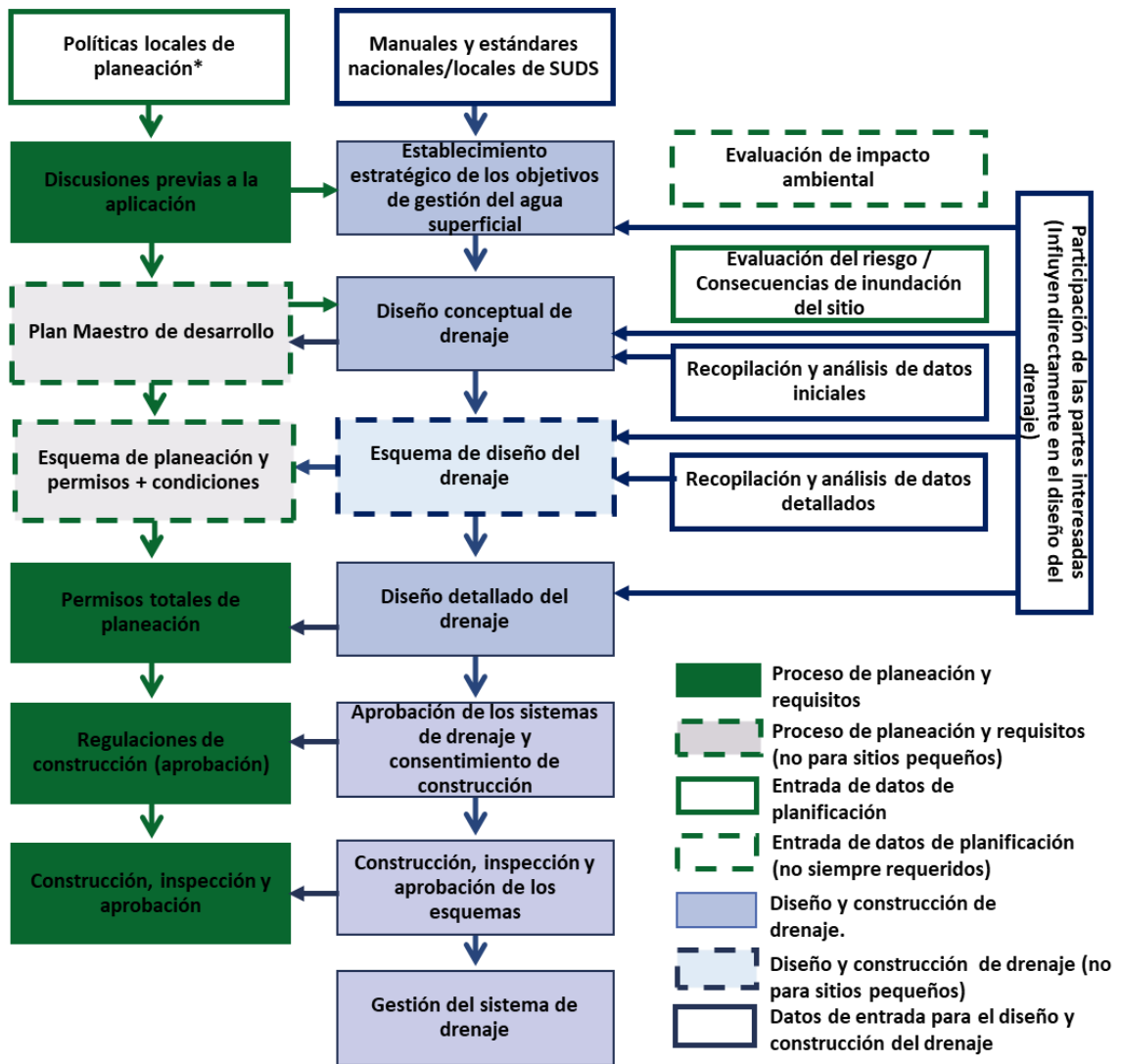


Figura 7. Proceso de diseño de drenaje: vínculos y planificación de uso de suelo. Adaptado de: (Woods-Ballard et al., 2015). \*Agua superficial, riesgos de inundación, diseño urbano, agua, biodiversidad, resiliencia climática, infraestructura verde

Estas discusiones tienen aportaciones significativas en el momento de garantizar los objetivos del sistema de gestión de aguas superficiales. La aprobación del diseño y la adopción de los enfoques de los SUDS, ayudan a garantizar el uso óptimo de los espacios disponibles estableciéndose en etapas iniciales en el diseño y en las condiciones del desarrollo, maximizando los beneficios que puede alcanzar la integración efectiva de la gestión del agua en las ciudades.

### 3.1.1.2. Políticas y Regulaciones para la aplicación

La aplicación exitosa de SUDS, por lo regular depende de la coordinación y la comunicación entre los desarrolladores/diseñadores y de partes interesadas, en los que se incluyen las autoridades locales de planificación urbana, de drenaje e inundaciones, ecología, gestión de los espacios y carreteras, así como también los reguladores ambientales, agua y empresas de alcantarillado, representantes comunitarios, organizaciones de residentes, entre otras partes interesadas del sector privado (Pappalardo & La Rosa, 2020).

La participación de los interesados es fundamental en todo el proceso de diseño de los sistemas de gestión de aguas superficiales, principalmente en el agua de escorrentía. La planificación del uso del suelo debe ser utilizada para reunir opiniones de las autoridades, tanto legales como no reglamentarias con otras partes de interés como las organizaciones no gubernamentales y el público en general (Pappalardo & La Rosa, 2020). Proporcionando un mecanismo con el cual los planificadores y reguladores ambientales establezcan relaciones en la aplicación de SUDS, generando una conciencia, educando a los desarrolladores e impulsando la interacción de la población con las oportunidades de aprendizaje.

En su parte, para los esquemas de modernización, esta participación puede facilitar la obtención de oportunidades potenciales de financiamiento de asociaciones, donde los beneficios de los esquemas serán acumulables para múltiples partes interesadas, y puede ayudar a asegurar los esquemas más rentables y de mayor calidad (CIRIA, 2012). Los procesos de diseño de tales esquemas también deberán alentar e involucrar a la comunidad; y los resultados más exitosos serán adquiridos donde las comunidades puedan actuar como “clientes” y “contribuyentes”, entendiendo papel que están tomando y teniendo conciencia de las oportunidades de una gestión eficiente de las aguas pluviales y superficiales del entorno (Digman et al., 2012).

El compromiso con la población local debe ser parte del proceso de planificación del desarrollo y el diseño de sistemas de drenaje. Existen una gran variedad de procesos que pueden ser utilizados, entre ellos: informar, consultar, involucrar, colaborar, empoderar, etc., pero la mayoría incluirá un elemento de educación y sensibilización, donde la comprensión tenderá al fomento de la apreciación del rol y los beneficios que juega la implementación de SUDS en la maximización ambiental, y un mayor sentido de responsabilidad por el mantenimiento y su protección.

### 3.1.1.3. Proceso de diseño en áreas urbanas

El proceso de diseño de SUDS debe incorporarse en su totalidad en un plan maestro como parte principal del uso de suelo y la planificación del desarrollo, y debe ser considerado en conjunto con otros aspectos del diseño. Este proceso permite que los planificadores y diseñadores logren e incorporen oportunidades para SUDS conforme evolucionan los usos de suelo y las ideas de diseño.

En este apartado se describen algunos de los aspectos que se consideran para el desarrollo de diseños conceptuales para SUDS en cada una de las etapas que sigue el proceso de planificación o plan maestro (AECOM, 2013). Se deben priorizar los beneficios potenciales de SUDS y ser adaptados a través del diseño; las condiciones del sitio también requieren de evaluación para que su diseño sea consistente y responda al contexto.

Los beneficios y las condiciones específicas del sitio suelen identificarse durante las etapas de diseño 1-2, y luego abordarse a través de las etapas de diseño 3-4 (AECOM, 2013):

#### **Etapas 1: Diseño Preliminar**

En la etapa inicial de diseño de SUDS se establecen los objetivos estratégicos de la gestión de aguas superficiales para el desarrollo (**Tabla 5**).

. Una consideración temprana de la gestión de los recursos hídricos superficiales ofrecerá a los diseñadores la oportunidad de usar SUDS apropiados al contexto de carácter local, enriqueciendo tanto al entorno natural como al construido.



Tabla 5. Etapa 1: Establecimiento estategico de los objetios de gestión de agua superficial.  
Adaptado de: (AECOM, 2013).

Plan maestro (Proceso)	Proceso de diseño para SUDS
Objetivos y alcances	<b>Identificación de metas y objetivos</b>
	Identificar metas de sostenibilidad relevantes para la gestión del agua superficial, incluyendo los requisitos de la política local de SUDS y las metas específicas del desarrollo.
1. Diseño Preliminar	<b>Prever posibles sinergias y desafíos</b>
	Las pruebas de viabilidad del esquema deben considerar las sinergias y los desafíos, destacando principalmente aquellos que pudiesen influir en el costo y los beneficios de la adopción de SUDS, en los que se incluyen:
<b>Esquemas en caso de negocio (viabilidad, factibilidad, pragmatismo)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posición del sitio dentro de una cuenca de captación más extensa, su aportación a los riesgos de inundación y su capacidad para soportar movimientos clave y corredores ecológicos;</li> <li>- Requisitos de áreas verdes y de los espacios públicos;</li> <li>- Necesidades de hábitat y paisaje;</li> <li>- Necesidad de reciclaje de agua de escorrentía;</li> <li>- Requisitos de planificación local y de las partes interesadas en la adopción y mantenimiento de SUDS;</li> <li>- Cambios en la permeabilidad del terreno que influyen en la atenuación y;</li> <li>- Riesgo de contaminación por escurrimientos, que determinan el nivel de tratamiento de agua necesario a través de SUDS.</li> </ul>

Con la integración de las aguas superficiales a los objetivos de desarrollo y en la consideración de que toda el área de aplicación es potencialmente funcional, los SUDS pueden ser usados en la mejora de la viabilidad del desarrollo cumpliendo con criterios de diseño establecidos y tiene como resultado lo siguiente (Woods-Ballard et al., 2015):

- Fuente alternativa de recursos hídricos para mejorar la seguridad hídrica futura
- Áreas de recreación, educativas y con mayor calidad dentro de espacios públicos abiertos
- Hábitats funcionales y mayor biodiversidad dentro de la urbe
- Mejora la resiliencia climática para los desarrollos
- Disminución en la presión sobre la infraestructura de alcantarillado y reducción de las inundaciones de aguas superficiales

- El establecimiento de estructuras naturales para el diseño de las áreas urbanas donde las vías de comunicación, el espacio público abierto y la infraestructura urbana se alinean con las rutas de transporte del flujo superficial de agua, y se integran a los componentes de tratamiento y almacenamiento de agua residual y de escorrentía respectivamente.
- Mecanismos para la mejora y definición de la calidad, el carácter y la estética visual del entorno construido y del espacio verde
- Un sistema de gestión de aguas superficiales que sea sostenible y se pueda mantener de manera sencilla y que sea rentable.

Se hace una consulta a las partes interesadas, se referencia a la planificación local y, a la orientación regulatoria, política y la evaluación de impacto ambiental (EIA) y evaluación de riesgos asociados a las inundaciones.

## Etapa 2: Diseño conceptual

La segunda etapa del proceso es conceptual: Identifica y evalúa los posibles componentes y vínculos de los SUDS en el desarrollo de un tren de gestión para cada una de las áreas disponibles del terreno. Cada una de las consideraciones establecen una serie de preguntas e indicadores para la evaluación e identificación de las mejores estrategias para la gestión de agua, incluyéndose los requisitos de las políticas locales y las metas o alcances específicos del desarrollo. El diseño conceptual se esquematiza y se describe en la Tabla 6.

Tabla 6. Etapa 2: Diseño conceptual de SUDS. Adaptado de: (AECOM, 2013)

	Plan maestro (Proceso)	Proceso de diseño para SUDS
<b>2. Definición conceptual</b>	<b>Evaluación de contexto (comprender el funcionamiento del sitio)</b>	<p><b>Análisis de línea de base de SUDS</b></p> <p>Se realiza una evaluación e identificación de referencia de los posibles beneficios de SUDS, los beneficios deseados y las condiciones del sitio que podrían interferir en el diseño.</p>
	<b>Marco espacial (Oportunidades y limitaciones)</b>	<p><b>Identificación de las rutas de flujo</b></p> <p>Se debe imitar los patrones de drenaje existentes y los flujos naturales; examinar la topografía para identificar las rutas de flujo natural y observar los cambios sustanciales requeridos a la topografía a través del desarrollo; identificar los sitios en los puntos más bajos donde el agua se descarga naturalmente para el mantenimiento de los procesos naturales y eliminar la necesidad de infraestructura adicional o bombeo; identificar los puntos de descarga</p>
		<b>Identificación de opciones de descarga</b>

Plan maestro (Proceso)	Proceso de diseño para SUDS
	<p><b>La determinación de hacia donde debería dirigirse el agua se realiza a través de una jerarquía de opciones:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>I. Reutilización del agua: ¿Existe necesidad de agua no potable?</li> <li>II. Infiltración: ¿Hay condiciones adecuadas en el suelo para infiltración?</li> <li>III. Descarga a un cuerpo de agua: ¿Hay un curso de agua o un cuerpo de agua en el área o cerca de, que pueda recibir agua?</li> <li>IV. Descarga al drenaje pluvial: ¿Existe una red de transporte superficial o subterránea en el sitio o cerca del sitio?, ¿Podría establecerse alguno?</li> <li>V. Descarga al drenaje combinado: Considerarlo como último recurso, buscar alguna conexión a un drenaje combinado cercano.</li> </ol> <p><b>Pueden existir múltiples puntos de descarga y tipos de descarga.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Diagrama de oportunidades y limitaciones de SUDS</b></li> </ul> <p>Se debe incluir un diagrama espacial en el que se identifican los posibles beneficios y las condiciones restrictivas para SUDS como parte del conjunto de diagramas de línea de base que conforma el marco espacial.</p>
<p><b>Formación del equipo de trabajo</b></p>	<p><b>Reunir habilidades adecuadas.</b></p> <p>Identificación de las habilidades necesarias para la estructuración del plan maestro y para el desarrollo de las mejores opciones de SUDS. Estas deben estar relacionadas con los beneficios deseados a desarrollar y las condiciones a abordarse. Especialistas con habilidades en la gestión deberán formar parte de cada equipo.</p>

### Etapa 3: Diseño esquemático

La tercera etapa es esquemática, debe desarrollarse en conjunto con las disposiciones del desarrollo y las características del paisaje e infraestructura. El diseño esquemático normalmente se requiere en las solicitudes de permisos de planificación y desarrollo. Es necesario dimensionar los componentes SUDS a escala local y es requerida la estimación de ciertos valores para que el diseño siga su proceso (Tabla 7).

Tabla 7. Etapa 3: Diseño esquemático de SUDS. Adaptado de: (AECOM, 2013)

<b>Plan maestro (Proceso)</b>	<b>Proceso de diseño para SUDS</b>
<b>Pruebas iniciales</b>	<p><b>Explorar el movimiento del agua</b></p> <p>El diseño inicia con la exploración de la relación entre el agua y el entorno construido. La localización y las dimensiones del sitio tendrán influencia en la tasa de escorrentía y a los riesgos de contaminación; la disponibilidad de oportunidades para la introducción de SUDS dependerá del diseño.</p>
	<p><b>Identificación de las subcuencas de SUDS (cuando sea conveniente)</b></p> <p>Conforme se van desarrollando los esquemas del plan maestro, las subcuencas pueden ir evolucionando y los trenes de gestión pueden variar de acuerdo con los requerimientos de componentes de SUDS para cada subcuenca.</p>
<b>Uso y destino del suelo (Esquema de distribución y relaciones)</b>	<p><b>Asignación del número de etapas de tratamiento</b></p> <p>Generalmente toda el agua de lluvia que cae en un lugar debe pasar por al menos dos etapas de tratamiento de SUDS para la mejora de la calidad del agua antes de su infiltración al suelo o su descarga. Este número debe ser definido en esta etapa para cada área de drenaje o subcuenca distinta.</p>
	<p><b>Estimación de los volúmenes de atenuación</b></p> <p>Partiendo de los usos de suelo y la densidad de los desarrollos, es posible hacer Hipótesis generales sobre los porcentajes de la superficie que es impermeable y generara escorrentía. Haciendo uso de los requisitos de las tasas de escorrentía local, se pueden calcular el volumen de escorrentía que debe atenuarse en el sitio y en las subcuencas. También pueden ser calculados manualmente o con herramientas de modelado.</p>
	<p>El volumen controlado en la fuente debe ser estimada a través de discusiones con el equipo de diseño para obtener un valor razonable de la escorrentía.</p>
<b>Conexiones clave (Conexiones estratégicas entre destinos)</b>	<p><b>Estructuración de las rutas de transporte</b></p> <p>Establecimiento de rutas y conexiones clave para peatones y vehículos. Los flujos naturales y las rutas de conexión antropogénicas deben ser inspeccionadas para el establecimiento de una cuadrícula de estructuración para el transporte de aguas superficiales a las áreas de almacenamiento y puntos de descarga.</p>
	<p>Es preferible que las rutas se establezcan conforme a la topografía para dirigir efectivamente el flujo de agua a su destino final.</p>
<b>Espacios abiertos (Infraestructura verde conectada)</b>	<p><b>Identificación de la ubicación de espacios verdes y públicos</b></p> <p>En su mayoría los desarrollos incluyen algún tipo de espacio abierto, sean parques urbanos o plazas públicas; de los beneficios clave de SUDS es su multifuncionalidad, su facilidad para integrarse a estos espacios libres de una manera sutil y obvia; un claro ejemplo es la incorporación de SUDS a espacios de recreación para evitar su inundación.</p> <p>El proceso del plan maestro puede identificar las ubicaciones clave para estos espacios a través de esta etapa, que deben ser consideradas como ubicaciones potenciales de SUDS.</p>

Plan maestro (Proceso)	Proceso de diseño para SUDS
Opciones de plan maestro (Pruebas)	<b>Esquematación del diagrama de gestión de agua</b>
	<p>La primera opción para la distribución del uso de suelo, se hacen pruebas preliminares de la ubicación de las rutas de transporte de SUDS, el área de almacenamiento y tratamiento también deben definirse espacialmente y ser discutidos con los diseñadores y las partes involucradas con el plan maestro general.</p> <p>Aquí pueden definirse o sugerir ideas para los tipos de SUDS a implementar.</p>

Estas consideraciones e informes del diseño esquemático deben ser suficientes para corroborar las aplicaciones de planificación de los esquemas y correspondería al dimensionamiento preliminar para cada uno de los componentes y rutas de gestión para los flujos excedentes.

#### Etapa 4: Diseño detallado

En la cuarta etapa del diseño son definidos los esquemas finales que van de acuerdo con el diseño del desarrollo. Los SUDS son dimensionados, se determinan los detalles para la proyección, se estiman los costos y se entrega la documentación necesaria para la aprobación (Woods-Ballard et al., 2015).

El funcionamiento y rendimiento hidráulico de los sistemas es evaluado para identificar su condición ante los eventos de diseño establecidos y así asegurar que las áreas de implementación de SUDS realmente sean funcionales (AECOM, 2013).

Así mismo se considera a qué grado los componentes SUDS son funcionales durante eventos de inundación, tomando en cuenta las rutas de flujo superficial del sitio desde sus exteriores u otras fuentes de inundación externas. Las tasas y el volumen probable de estos flujos adicionales deberán estar presentes en el diseño del sistema para que la población y su entorno no corran riesgo. El diseño detallado o final se esquematiza y se describe en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Etapa 4: Diseño detallado de SUDS. Adaptado de: (AECOM, 2013)

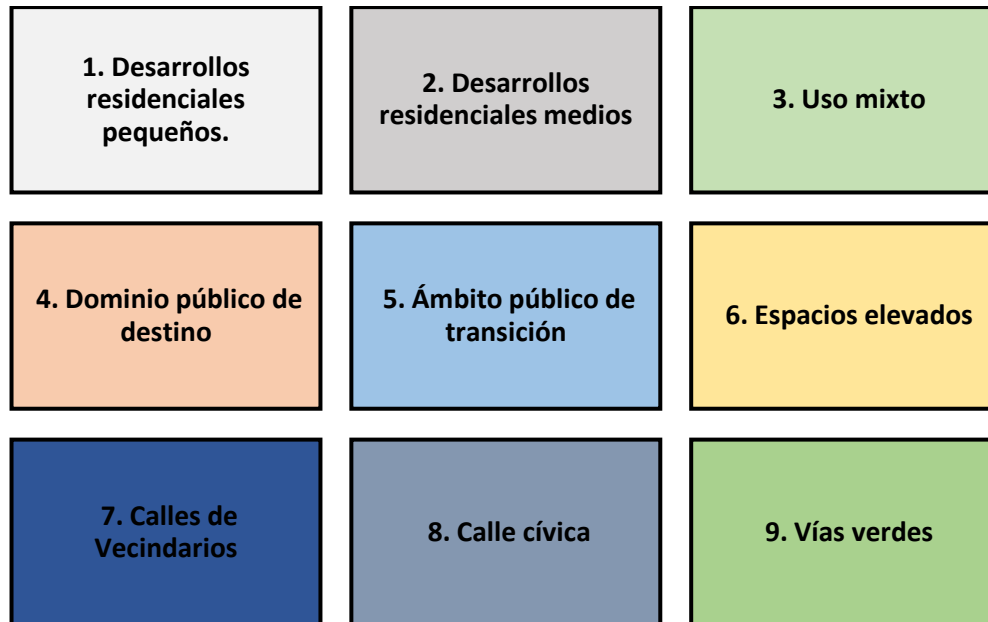
Plan maestro (Proceso)	Proceso de diseño para SUDS
4. Refinamiento del diseño	Diseño y optimización de SUDS

	<p>La propuesta de SUDS se puede desarrollar a un nivel conceptual; el diseño detallado a escala local de desarrollo se completará después de esta etapa y el contenido comenzará a construir los detalles requeridos para un plan de manejo de aguas superficiales del sitio. aquí las soluciones se pueden mejorar para ofrecer la mejor relación costo-beneficio.</p>
	<p><b>Diseño conceptual de SUDS: Bloques y edificios</b></p>
<p><b>Arquitectura (Carácter del área y tipologías de construcción)</b></p>	<p>La elección y el diseño conceptual final de SUDS deben considerar el tipo de techo (plano, pendiente simple, pendiente doble), el entorno del edificio (jardines, patios), los usos del edificio y su demanda de agua. En esta etapa se realiza el dimensionamiento del esquema de características específicas.</p>
	<p><b>Diseño conceptual de SUDS: Calles</b></p>
<p><b>Diseño de calle (carreteras y calles)</b></p>	<p>En conjunto con el desarrollo de secciones y visualizaciones de calles los componentes de SUDS deberán seleccionarse y dimensionarse lo más aproximado al sitio; los medios de transporte en la superficie como las cunetas, deben tener suficiente espacio en esta etapa</p>
	<p><b>Diseño conceptual de SUDS: Espacios abiertos</b></p>
<p><b>Paisaje (Espacios abiertos y espacio público)</b></p>	<p>Los SUDS deben elegirse y dimensionarse en conjunto con el desarrollo conceptos y visualizaciones del paisaje</p>
	<p><b>Creación de un resumen de SUDS</b></p>
	<p><b>La visión de SUDS deberá integrarse en los planes maestros de desarrollo.</b></p>
<p><b>Resumen o directrices para el desarrollador</b></p>	<p>En esta visión o concepción de SUDS puede ser integrada en informes para desarrolladores o en guías de diseño usando diseños que ejemplifiquen y muestren los criterios planteados para SUDS.</p> <p>El resumen de SUDS deben garantizar que se reconozcan la variedad de beneficios clave y las condiciones de los sitios ya que son las bases para el diseño de SUDS a escala local. Sera posible presentar una selección de opciones de SUDS si es que se desea que se brinde más flexibilidad a quienes realizan la etapa de diseño detallado.</p>

Tomando en cuenta los costos y los beneficios de los SUDS el diseño final debe ser refinado en conjunto con la evaluación de riesgo, sea a la salud o a la seguridad de la infraestructura, y así también a las consideraciones de construcción y mantenimiento del sitio (AECOM, 2013). Los componentes individuales de SUDS deben finalizarse y detallarse siguiendo las guías existentes y/o la literatura de los fabricantes.

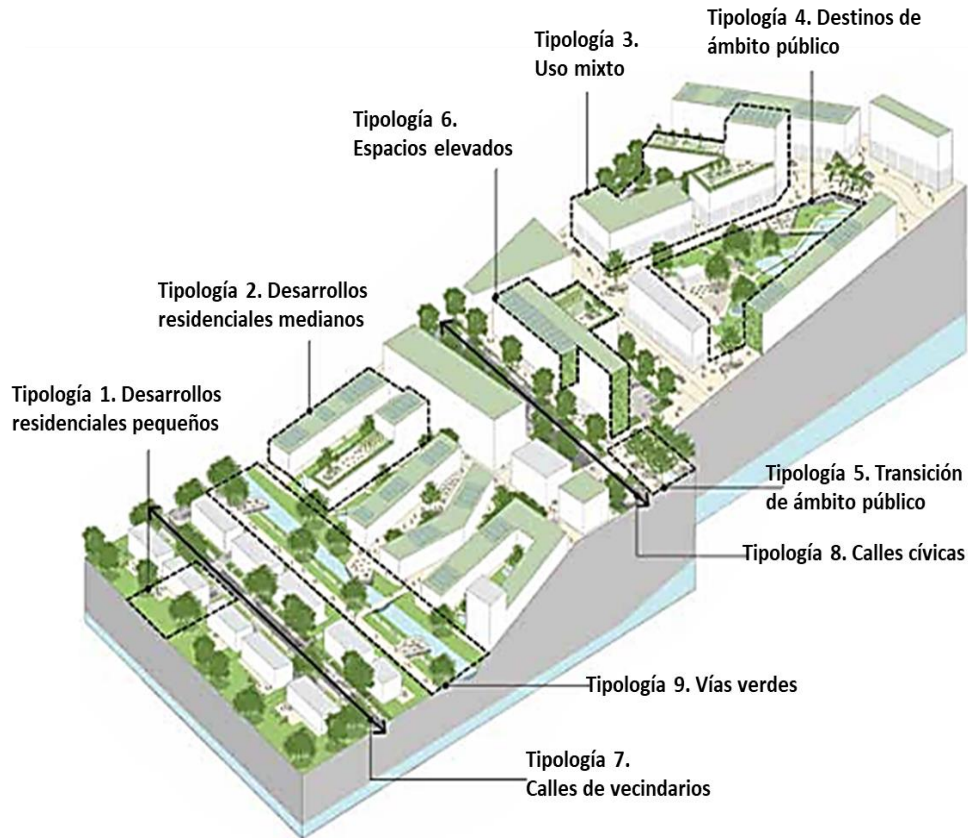
#### 3.1.1.4. Tipologías de desarrollo urbano para la aplicación de SUDS

Existen varias tipologías que representan las diferentes condiciones urbanas en las que se pueden incorporar SUDS (**Figura 9**) (Woods-Ballard et al., 2015). Estas tipologías no son de carácter exhaustivo; son ilustrativas y su representación no debe seguirse estrictamente, sino que deben ser adaptadas al contexto específico del sitio.



**Figura 8.** Tipologías de Desarrollo urbano. Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones urbanas al ser abstractas se representan de manera simplificada a través del establecimiento de tipologías con el fin de mostrar la posibilidad de alcanzar un diseño integral en conjunto con los componentes de los SUDS (**Figura 9**). Los enlaces establecidos entre ambos pueden indicarse de forma esquemática ya que la especificación del diseño sería compleja para mostrarse de manera detallada. En este sentido para cada tipología existirá una amplia gama de posibilidades y soluciones de gestión de aguas superficiales.



**Figura 9.** Tipologías dentro del paisaje urbano. Adaptado de: (Woods-Ballard et al., 2015))

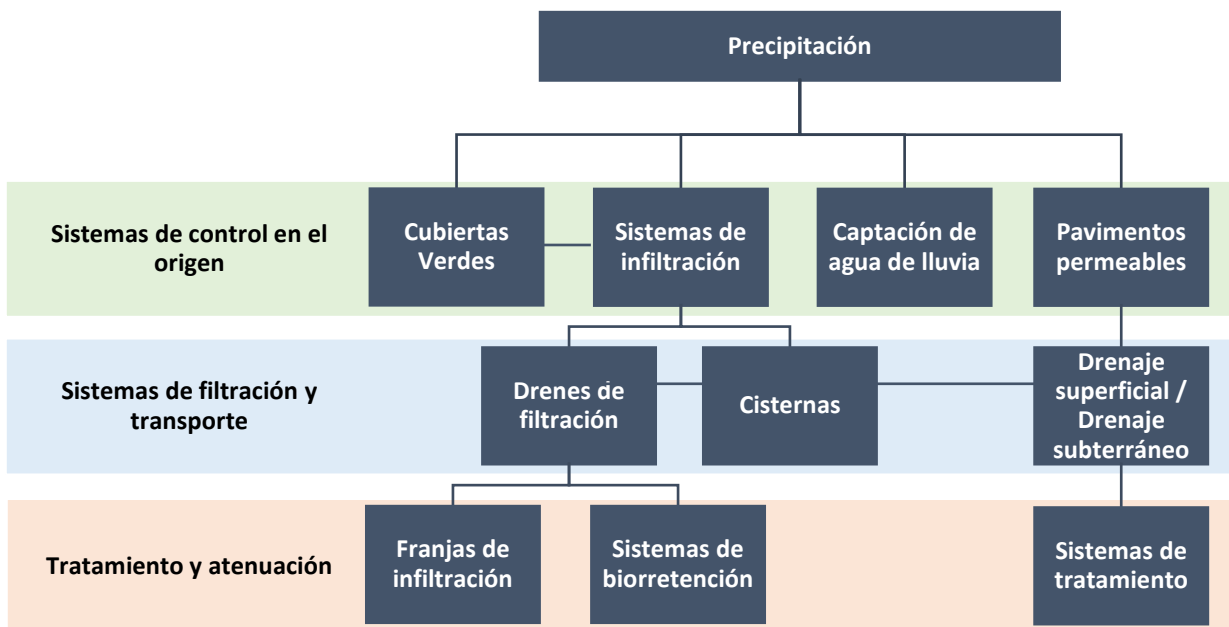
En cada una de las tipologías puede ser incluida una amplia variedad de SUDS, los cuales pueden ser incorporados individual o conjuntamente. Sin embargo, en un contexto real es posible que no se puedan integrar todos los componentes previstos y en gran medida dependerá de los objetivos estratégicos de gestión del agua superficial, de las condiciones del sitio y de las proyecciones de urbanización.

Las tipologías están diseñadas para su aplicación en nuevos desarrollos urbanos dentro de conurbaciones existentes. No obstante, la mayoría de los componentes de SUDS son adaptables a cualquier desarrollo urbano (Woods-Ballard et al., 2015). Estas características no son necesariamente representativas de todos los sitios de las áreas urbanas existentes. El desarrollo de ideas deberá de ir mejorando y adaptándose al contexto real del sitio y al presupuesto destinado para cada caso, de forma tal que las tipologías sean funcionales conforme a las oportunidades y limitantes del sitio, al mismo tiempo que brinden un gran beneficio al entorno urbano (Woods-Ballard et al., 2015).



### 3.2. Consideraciones Técnicas e Infraestructura

Las consideraciones y/o componentes estándares de SUDS pueden ser clasificados según su funcionalidad, i.e. si controlan el agua en la fuente, transportan el agua a una ubicación diferente o proveen tratamiento o atenuación de agua (Griffiths, 2017). Su configuración genérica es una secuencia de SUDS que enrutan la precipitación como entrada a un flujo de agua receptor (**Figura 10**).



**Figura 10.** Configuración genérica de diferentes componentes dentro de SUDS. Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de los componentes del sistema tienen multifuncionalidad y pueden ser adaptados a una gran variedad de configuraciones en el diseño final. Los componentes de “control en la fuente” pueden ser vinculados directamente a los de “tratamiento y atenuación” en un área pequeña donde no se tiene la necesidad de transportar el flujo dentro del sitio. Así mismo, los sistemas de infiltración y los sistemas de biorretención también tienen la posibilidad de ser incorporados a los componentes de control en la fuente y los de transporte en lugar de solamente disponerlos a los cuerpos de agua receptores.

### 3.2.1. Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL)

Un SCALL es definido por la recolección de la escorrentía generada por el agua de lluvia para su aprovechamiento en áreas específicas. La escorrentía normalmente es colectada de los techos y otras superficies impermeables, almacenada, tratada y aprovechada como suministro de agua para uso doméstico, comercial, industrial e institucional (Woods-Ballard et al., 2015). Los SCALL proporcionan una serie de beneficios clave:

- Pueden satisfacer parte de la demanda de agua, brindando beneficios de sostenibilidad y resiliencia climática
- Pueden ayudar a reducir el volumen de escorrentía en un sitio
- Pueden ayudar a reducir el volumen de almacenamiento de atenuación requerido en el sitio.

El agua de lluvia colectada generalmente puede ser utilizada para diversos propósitos; su potencial de recolección dependerá del uso propuesto del agua, su grado de contaminación y el proceso de tratamiento proporcionado. El diseño de SCALL es específico, el cual puede abordar solamente los servicios de suministro de agua o la gestión de aguas superficiales (**Tabla 9**) (Woods-Ballard et al., 2015).

**Tabla 9.** Objetivos e implicaciones de diseño de SCALL

<b>Objetivos de SCALL e implicaciones de diseño</b>	
<b>SCALL destinados a la conservación de agua (suministro).</b>	Diseñados para el suministro de agua al sitio de implementación. El almacenaje de escorrentía pluvial es dimensionado para captar y retener un volumen apropiado del área de contribución (rendimiento) para cumplir con los requerimientos de uso proyectados (demanda). El desempeño de estos sistemas estará relacionado con la magnitud del evento de lluvia que se presente, que en ocasiones sobrepasaran los eventos de diseño y la confiabilidad será baja. Por lo que no es permitida ninguna contribución hacia la gestión de aguas superficiales como parte del diseño

---

## Objetivos de SCALL e implicaciones de diseño

---

### SCALL destinados al manejo de agua superficial, "Sistemas Pasivos".

El diseño en estos sistemas es destinado al almacenamiento del suministro requerido de agua en el sitio, más el requerido para el manejo de un volumen específico de escorrentía pluvial durante eventos de gran intensidad.

Un sistema pasivo está referido al hecho que la disponibilidad de almacenaje para la escorrentía pluvial en cierto momento dependerá completamente del equilibrio entre la demanda y oferta, y los niveles de agua no se gestionan como un activo.

En la implementación de SCALL a un conjunto de viviendas individuales, existe la probabilidad que el manejo del agua superficial sea bajo para eventos de lluvia de diseño y se asume un nivel promedio de cumplimiento; y de manera contraria en un conjunto de propiedades que comparten el almacenamiento, o donde existe una demanda constante, el rendimiento del sistema es más seguro.

---

### SCALL destinados al manejo de agua superficial, "Sistemas Activos".

En este caso, si el almacenamiento de agua se gestiona de forma activa; todas las viviendas pueden diseñarse para cumplir los objetivos de la gestión de los recursos hídricos superficiales, independientemente de los niveles relativos de la oferta y de la demanda, siempre que el sistema se gestiona de modo que no se produzca ningún nivel de escorrentía.

Hay dos mecanismos disponibles para garantizar que haya suficiente volumen de almacenamiento para gestionar la profundidad de eventos de diseño:

- I. pronosticar los eventos de tormenta (días u horas antes) y bombear el agua almacenada;
- II. Bombear el agua almacenada hasta un nivel establecido siempre que se supere el umbral.

En la primera opción requiere de información de pronósticos de lluvia. El segundo requiere una configuración de tiempo en las bombas para que el agua se bombee a cierto tiempo establecido después de la ocurrencia de un evento.

---

Un SCALL se conforma principalmente por: captación, recolección, conducción, sistema de primeras aguas y almacenamiento (CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2016):

- Captación: Conformado por la superficie de escurrimiento con adecuada pendiente que propicie un mejor escurrimiento de agua de lluvia hacia el siguiente componente del sistema.
- Recolección: Este componente incluye la conducción y es una parte fundamental del sistema pues conduce el agua recolectada a lo largo del sistema por canaletas hasta su almacenamiento.
- Sistema de primeras aguas: Su función es la separación y/o descarga de las primeras aguas que corresponden al lavado de la superficie de escurrimiento, al fin de evitar el almacenamiento de agua con mayor grado de contaminación.
- Almacenamiento: Depósito para el almacenamiento del agua de lluvia obtenida.

Hay tres tipos principales de SCALL:

I. Sistemas basados en la gravedad

Están diseñados para que la escorrentía generada se recoja por gravedad y sea almacenada en la cubierta para que se suministre por gravedad (**Figura 11**). La escorrentía puede ser captada en techos inclinados y almacenarse en espacios del techo (depósitos) o en el mismo techo.

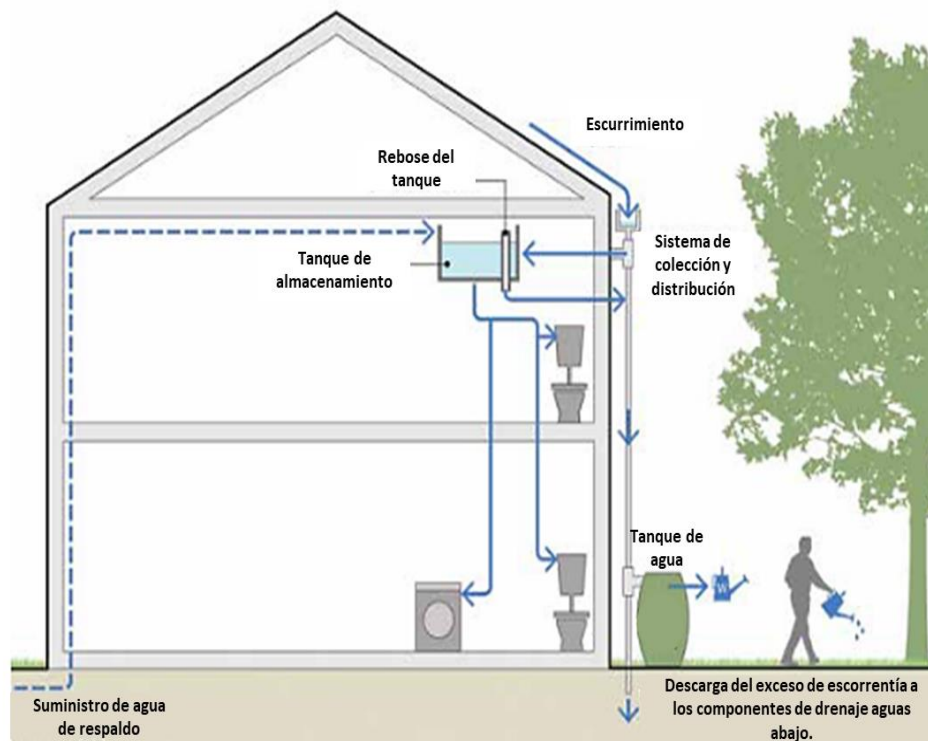
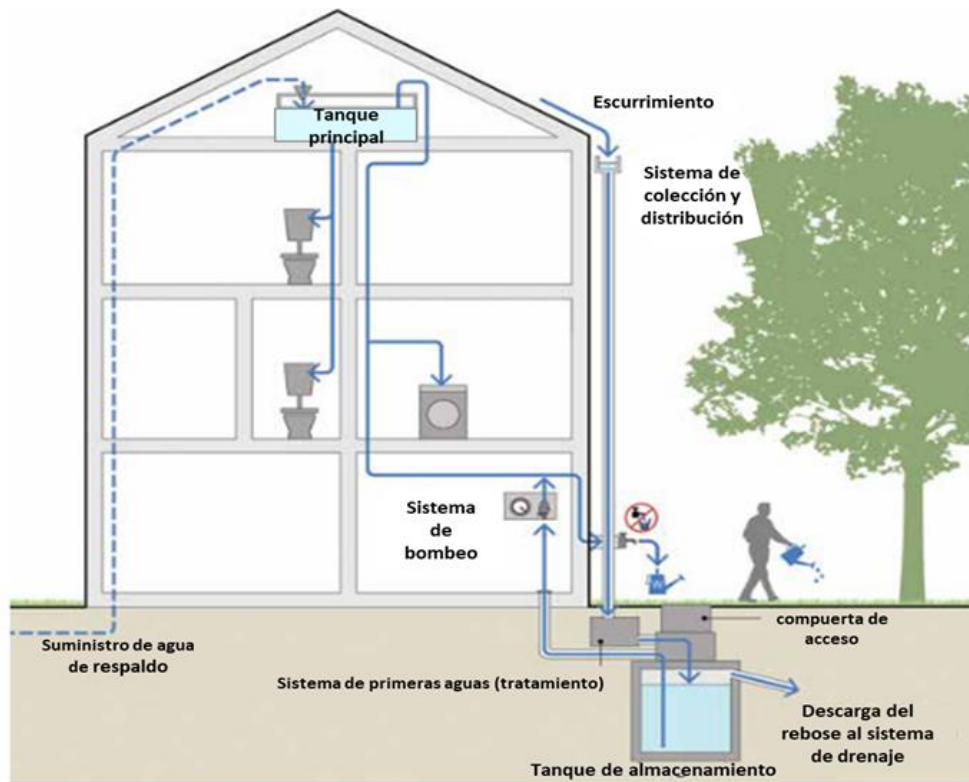


Figura 11. SCALL basado en gravedad y sus componentes. Adaptado de: (Woods-Ballard et al., 2015).

Algunas limitantes en el diseño son: La capacidad estructural del edificio para el almacenamiento del agua; la recolección del agua superficial en el techo que permita el suministro por gravedad; la presión requerida para el funcionamiento del sistema; y la temperatura el agua almacenada.

II. Sistema de bombeo

Estos sistemas tienden a la acumulación del agua bajo tierra o al nivel del suelo y luego bombear el agua para el suministro. Existen dos sistemas de bombeo: los que bombean a un tanque colector para su uso posterior y los que son bombeados directamente a las unidades del edificio para el suministro (**Figura 12**).



**Figura 12.** SCALL basado en Bombeo y sus componentes. Adaptado de: (Woods-Ballard et al., 2015).

### III. Sistema compuesto

Es la conjunción de los dos sistemas anteriores; usan a su ventaja los procesos de gravedad y de bombeo. La escorrentía pluvial generada pasa directamente a un depósito de almacenamiento; mientras que el exceso se puede almacenar en otro depósito principal en el suelo. Cuando se requiere suministro el agua se bombea al tanque principal (si está vacío) aunque es probable que el depósito principal sea más pequeño que el que está en el suelo.

En todos los sistemas, es necesario asegurar que, si se agota el almacenamiento del agua captada, se dispone del suministro alternativo apropiado de agua para satisfacer las necesidades (Woods-Ballard et al., 2015). Es importante mencionar que la disponibilidad de almacenamiento en los SCALL no está garantizada, salvo que su diseño considere el desagüe hacia aguas abajo o al subsuelo en cualquiera de los casos. Sin embargo, no hay certeza que avale adecuadamente su nivel de rendimiento frente a eventos específicos de lluvia.

La captación de agua de lluvia puede ser aprovechada en el desarrollo residencial e industrial para nuevos proyectos o su modernización para la conservación y la gestión del agua superficial (Figura 13).



Figura 13. SCALL implementados en viviendas individuales. Fuente: islaurbana.org

Hay una serie de características específicas del sitio que influirán en el diseño de los SCALL. La selección y ubicación de dichos sistemas dependerán de las condiciones físicas del sitio, además es necesaria la accesibilidad a todos los componentes que conforman al sistema con la finalidad de garantizar su mantenimiento (CIRIA, 2017).

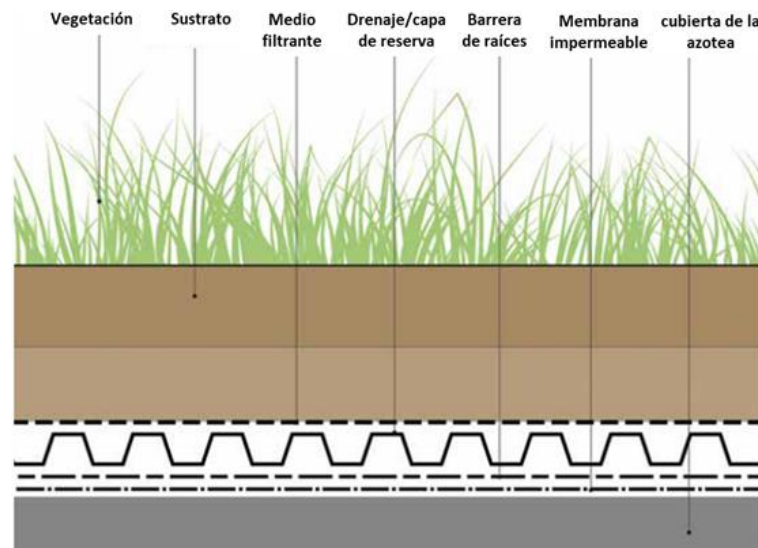
La captación de agua de lluvia en áreas urbanas es una estrategia alternativa de beneficios múltiples que puede contribuir a los problemas de escasez actual del agua, el deterioro de las vías acuáticas naturales sobre la ciudad e inundaciones causadas por el escurrimiento de aguas pluviales en entornos urbanos y por la combinación de los desagües pluviales y sanitarios. Asimismo los SCALL pueden contribuir a reducir o aligerar la presión económica y ambiental que se ejerce sobre los recursos hídricos en áreas urbanas pues conforme incrementa la población también lo hace la demanda (Vargas Parra, 2015).

A pesar de que el agua captada suele ser una la fuente alternativa más limpia disponible en cuanto al contenido de minerales (OMS, 2008) se prefieren alternativas como la desalinización para satisfacer el suministro de agua en áreas urbanas. Sin embargo, recientemente se han promovido el uso de fuentes de agua alternas, como el agua de lluvia. La viabilidad técnica de los SCALL depende principalmente de la precipitación a lo largo del año, de la cantidad y calidad del agua para su uso,

y del presupuesto que se le destine a la implementación de los sistemas (Ávila Morales, 2013; CONAGUA, 2016b).

### 3.2.2. Cubiertas verdes/techos verdes

Las cubiertas verdes son áreas de vegetación viva que recubren la parte superior de los edificios. Son determinantes para la restauración hidrológica en áreas urbanas y alternativas a las prácticas más convencionales; proporcionan la transformación de superficies impermeables a permeables para contribuir en la gestión del agua pluvial.



**Figura 14.** Secciones típicas de una instalación de cubierta verde. Adaptado de: (Woods-Ballard et al., 2015)

La respuesta hidrológica de las cubiertas verdes tiende a reproducir el proceso natural del ciclo hidrológico (Palla & Gnecco, 2018). Los tipos de cubiertas verdes se pueden dividir en dos categorías principales (Woods-Ballard et al., 2015):

#### I. Extensivas:

Tienen una baja profundidad de sustrato (menor carga estructural del edificio), plantación simple y bajos requerimientos económicos y de mantenimiento; tienden a no ser accesibles, solo para su mantenimiento. Generalmente se comprenden de un medio de cultivo de 20 – 150 mm de

espesor y pueden ser en una sola capa (drene libre y apoya al crecimiento de plantas) o en multicapas (incluyen una capa de cultivo y una capa de drenaje subyacente separada).

## II. Intensivas:

Tienen sustratos profundos (mayor carga estructural del edificio), pueden soportar una amplia variedad de plantación, pero tienden a requerir un mantenimiento más intensivo; generalmente son accesibles. Diseñados para proveer de biodiversidad y amenidad al entorno. Esta categoría cuenta con un sustrato más profundo que las extensivas, con un medio de cultivo > 150 mm y también cuenta con elementos de agua y almacenamiento de agua de lluvia para su uso en el riego.



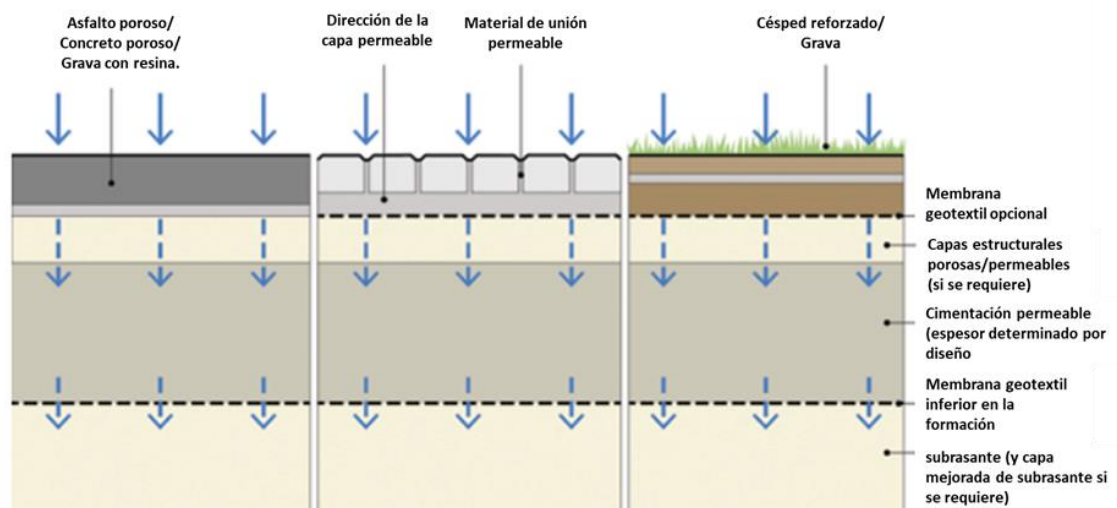
**Figura 15.** Cubierta Verde instalada en Infonavit en CDMX. Fuente: Landezine International Landscape Award.

Los rendimientos térmicos de los edificios pueden mejorar mediante la instalación de cubiertas verdes, reduciendo potencialmente los costos energéticos, debido a que la vegetación y el sustrato enfrían la superficie a través de la evapotranspiración en el verano. Por el contrario, el aislamiento térmico durante el invierno dependerá de la capacidad de retención de agua del techo. Así mismo, ayudan a combatir el efecto de “Isla de calor Urbana” y contribuye en la mejora de la calidad el aire mediante la captura de partículas contaminantes (Palla & Gnecco, 2018).



### 3.2.3. Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables son estructuras que permiten el tránsito de peatones y vehículos y, a su vez, permite la filtración de escorrentía hacia una subbase de almacenamiento temporal compuesta por una serie de materiales filtrantes (**Figura 16**). Tras el almacenamiento, el agua se infiltra y/o se evacua a través de drenes hacia aguas abajo (Del et al., 2000). Las superficies permeables, en conjunto con sus subestructuras, son significativamente eficientes en la gestión del agua superficial cerca de la fuente de generación, intercepta la escorrentía, reduce el volumen y la frecuencia del flujo, y provee un tratamiento en el medio (S. Perales-Momparler et al., 2019).



**Figura 16.** Sistema de pavimento permeable/poroso. Adaptado de: (Woods-Ballard et al., 2015).

El proceso de tratamiento ocurre en la estructura superficial, en las capas de suelo subyacentes donde es posible la infiltración y en las capas se incluyen: filtración, adsorción, biodegradación y sedimentación.

De acuerdo con su función en la superficie permeable, se clasifican en (Woods-Ballard et al., 2015):

#### I. Pavimentos permeables:

Filtran el agua por medio de la superficie, la cual puede componerse de asfalto permeable, hormigón (permiten el paso del agua a través de huecos en el agregado), pavimentos vegetados y sistemas de malla o geocelda (la escorrentía se percola a través de capas filtrantes de grava y vegetación).

## II. Pavimentos permeables por junta:

Cuentan con una superficie formada por materiales impermeables, pero su diseño y disposición crean espacios a través de los que se infiltra la escorrentía, son estructuras como adoquines de hormigón o cerámicos, donde los espacios libres están rellenos con material permeable como grava, arena o vegetación, brindando permeabilidad a la superficie que ayuda a filtrar sedimentos y contaminantes arrastrados por la escorrentía.

Los principales criterios de diseño son los relacionados al área de implementación. El mismo sistema en su totalidad es el área de captación, para ello la relación del área permeable que gestiona las áreas impermeables adyacentes suele tener una relación impermeable-permeable 2:1 y su diseño debe considerar la recepción directa de la escorrentía de las áreas adyacentes (**Figura 17**).



**Figura 17.** Pavimentos permeables instalados. Fuente: verdeceto.com.mx.

En cuanto a las áreas vegetadas que no suelen drenar directamente la escorrentía, su emplazamiento tiene que ser ubicado estratégicamente y adecuándose a los métodos de construcción para prevenir su colmatación (S. Perales-Momparler et al., 2019). Otro factor importante es su localización, en la cual los servicios del subsuelo, presentes y futuros, deben tenerse en cuenta para garantizar la instalación de pavimentos permeables a largo plazo (CIRIA, 2017).

#### 3.2.4. Sistemas de Infiltración

Los Sistemas de Infiltración permiten que la escorrentía de agua de lluvia se infiltre en suelos permeables y limite su flujo a drenajes de agua superficial. Hay diversos tipos de componentes que pueden ser usados para proveer: sumideros, zanjas y cuencas de infiltración (CIRIA, 2017). Estos sistemas pueden contribuir a reducir la tasa de escorrentía que normalmente es más rápida que la tasa de infiltración, facilitando la descarga de escorrentía de aguas superficiales al suelo y después al agua subterránea.

El rendimiento de los sistemas de infiltración depende de la permeabilidad del suelo en el área de aplicación y de la profundidad del agua subterránea, es por esto por lo que es necesario determinar la permeabilidad natural del suelo antes de su construcción y evitar su compactación durante la construcción. Así mismo, se requiere un tratamiento previo, aguas arriba para eliminar las cargas de sedimentos y la contaminación del agua subterránea.

Su diseño está enfocado al manejo de tormentas y a los estándares de los servicios requeridos para contribuir a la captación de la escorrentía en el área; puede ser un evento de 1:10 o 1:30 años, o según sea su contexto. Así mismo los criterios de descarga del sitio generalmente se basan en eventos de 1:100 años con una tolerancia para los cambios climáticos, es necesario conocer los rendimientos de los sistemas de infiltración en dichas condiciones (Woods-Ballard et al., 2015).

##### 3.2.4.1. Zanjas y pozos de infiltración

Concebidas como estructuras de infiltración similares a pozos de infiltración, pero con configuración lineal y no vertical, la escorrentía procedente de la superficie impermeable adyacentes se vierte y se almacena mientras se infiltra en el área de suelo natural. Generalmente se componen de vegetación y favorecen la sedimentación de partículas y contaminantes arrastrados por la escorrentía, lo que posibilita una disminución significativa del volumen de agua sobre la superficie. No actúan únicamente por medio de la infiltración que tiene el área en la superficie de la zanja, sino que también tiene la funcionalidad del transporte hacia otros componentes SUDS.

La configuración de las zanjas es de poca profundidad que va de 1 a 3 metros, su relleno es de materiales granulares o sintéticos, y suelen utilizar geotextiles como componentes filtrantes y

divisionales para envolver los materiales granulares y los desagües de rebose para los supuestos excesos de capacidad del almacenamiento de diseño y así evitar que los excedentes de agua se dirijan a las redes de alcantarillado.

El volumen de almacenamiento del sistema es un criterio importante en su diseño ya que depende del área impermeable, la permeabilidad y la estabilidad del terreno, los patrones de lluvia, la porosidad de material drenante y los espacios disponibles, una consideración importante es el tiempo de drenado del sistema, estos deben vaciarse dentro de 48 horas posteriores a un evento de lluvia.

### 3.2.5. Sistemas de Biorretención

Los sistemas de biorretención son depresiones de poca profundidad, se encuentran ajardinadas y tienen la función de reducir las tasas y el volumen de escorrentía superficial; además son funcionales para el tratamiento de escorrentía por el arrastre de contaminantes, esto a través del uso de suelos y vegetación específica. Son eficaces para interceptar los flujos de agua y proporcionan:

- Características visuales atractivas de paisaje que son autosuficientes
- Hábitat y biodiversidad
- Regula la temperatura del microclima local por efecto de evapotranspiración

Son componentes flexibles de gestión de aguas superficiales que integran gran variedad de paisajes de desarrollo usando diferentes escalas, formas, plantaciones y materiales. En desarrollos de baja densidad pueden tener bordes y pendientes suaves, mientras que en desarrollos de alta densidad pueden tener bordes duros con lados totalmente verticales (CIRIA, 2017). Estos bordes determinan la interacción entre el hábitat y las comunidades.

Es posible utilizar mezclas de suelos y vegetación (diseño específico) como medios filtrantes que mejoran el rendimiento de tratamiento del sistema y asimismo es posible implementar diseños en los que se incluyan zonas anaerobias para promover la eliminación de nutrientes. La escorrentía filtrada es recolectada por un sistema de drenaje inferior o, si es posible se infiltra total o parcialmente en el suelo circundante, esto sujeto a las condiciones del sitio. El principal beneficio hidráulico de los sistemas de biorretención es la intercepción de los flujos de agua de escorrentía.

Sin embargo, la atenuación en la superficie o en las capas inferiores gestiona las tasas de escorrentía y ralentiza los flujos de agua en la superficie del sistema.

Existen varios enfoques para el diseño de sistemas de biorretención. No obstante, los principales componentes en un sistema de este tipo son: Pendiente lateral (entrada); área de detención (profundidad y extensión); vegetación; medio filtrante; capa de transición; capa de drenaje; tuberías/conductos de desagüe; y tuberías de rebose.

Normalmente son útiles para la gestión y el tratamiento de la escorrentía superficial en eventos de lluvia frecuentes, en caso de que existan o se presenten eventos más extremos de lluvia es necesario considerar el impacto de la velocidad de diseño en el sistema y suele ser más apropiado derivar la escorrentía excedente a componentes aguas abajo.

### 3.2.6. Sistemas de Tratamiento

Estos sistemas son productos desarrollados y van enfocados a la eliminación de contaminantes específicos que son arrastrados por la escorrentía de aguas superficiales. Son útiles principalmente cuando existen limitaciones en el sitio que impiden el uso de otras metodologías o cuando se ofrecen beneficios que facilitan la incorporación de los criterios de diseño de SUDS para un sitio. Su estructura regularmente se encuentra bajo la superficie y, a menudo, funcionan como sistemas complementarios a las características del paisaje, reduciendo los niveles de contaminantes en la escorrentía pluvial y protegiendo la funcionalidad de la biodiversidad de los componentes de SUDS aguas abajo.

Su utilidad va más allá de la reducción del mantenimiento de los SUDS aguas abajo, sino que también son funcionales en la reducción de los riesgos a las áreas adyacentes durante la eliminación de los sedimentos; a lo largo del tiempo se han considerado como dispositivos de pretratamiento. Sin embargo, pueden desempeñar funciones valiosas en la eliminación de contaminantes y, por lo tanto, es posible considerarlos como parte integral del *tren de gestión de SUDS* en situaciones específicas. Existen sistemas que ofrecen la reducción a un amplia gama de contaminantes, y se encuentran en un desarrollo continuo de patentes cada vez más sofisticadas para su utilización en los tratamientos de escorrentías en áreas urbanas (Woods-Ballard et al., 2015).

En cuanto al rendimiento de los sistemas depende de un mantenimiento continuo y en mayor medida de la inspección rutinaria en comparación con otros SUDS, aunque esto será específico a los sistemas y a su diseño; cuando sea posible la acumulación de grandes volúmenes de sedimento en el dispositivo, normalmente se requieren equipos de succión para su eliminación, y se deberá propiciar un acceso adecuado. Cuando se identifique que no es requerido un mantenimiento, el régimen de mantenimiento debe ser sólido, de modo que las actividades se realicen a pesar de una visibilidad nula del sistema en la superficie.

Cuando el diseño se acople a los manuales disponibles, los componentes SUDS como los descritos en 3.2.2., 0 y 3.2.5 generalmente deberán brindar tratamiento en conjunto con el control hidráulico y los beneficios a alcanzar de amenidad y biodiversidad. Con estos sistemas y los sistemas patentados o prefabricados, la intercepción y atenuación de los contaminantes deberá brindarse por separado haciendo uso del almacenamiento superficial y subterráneo, y también tomar en consideración alternativas que brinden servicios y criterios de biodiversidad.

### 3.3. Modelos Disponibles para Simulación de SUDS

Pese al conocimiento y a la concepción de que nuevas estrategias de gestión de los recursos hídricos superficiales son necesarias, la transición hacia un diseño de sistemas urbanos de drenaje más sostenibles globalmente ha sido lenta y más aún en México. Esto se ve reflejado, entre otros factores, en la escasez de instrumentos de diseño que operen de manera efectiva a nivel escala. La disponibilidad de softwares de modelado de SUDS efectivos podría actuar de en el fomento de una mayor aceptación de los principios y enfoques de estos (ver sección 3.1).

Los instrumentos de modelado pueden solucionar esta necesidad al hacer que el diseño y la implementación de SUDS sea más eficiente y así demostrar las resoluciones que sean útiles para el aprendizaje y el desarrollo de políticas dirigidas al uso e implementación de sistemas sostenibles. El desafío de toda simulación o modelado es la reproducción o traducción de procesos naturales complejos y variables en un instrumento de modelado, en el cual se permita una evaluación concreta de los SUDS en una amplia gama de contextos aplicables a la gestión urbana de agua.

Los modelos son herramientas críticas y eficientes que ayudan a la comprensión de los procesos hidrológicos que ocurren a diferentes escalas espaciotemporales, y han sido utilizados

comúnmente en la investigación de los efectos del cambio de uso de suelo en la hidrología del sitio de estudio (Her et al., 2017).

### 3.3.1. Tipología de modelos de gestión de aguas superficiales

Existen varios modelos de simulación hidrológica disponibles en el mercado (**Tabla 10**). Su diferenciación se basa en su aplicabilidad y en su especificidad, pues cuentan con diferentes requisitos a la hora de incorporar los valores y/o datos de simulación (entradas), al igual que en la variación de los resultados obtenidos (salidas). Los modelos a su vez pueden ser clasificados o categorizados conforme a su enfoque metodológico.

**Tabla 10.** Modelos disponibles e información introductoria. Adaptado de: (Elliott & Trowsdale, 2007).

<b>Modelo</b>	<b>Versión</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Costo (USD-MXN)</b>
<b>MOUSE</b>	Primera: 1985 Última: 2004	Simulación a detalle del drenaje urbano, escorrentía, calidad de agua, y transporte de sedimentos.	~ 5000 USD – 65,850 MXN
<b>MUSIC</b>	Primera: 2000 Última: 2020	Diseño conceptual de sistemas de drenaje con énfasis en dispositivos de tratamiento	~ 300 USD – 3,300 MNX
<b>P8-UCM</b>	Primera: 1990 Última: 2015	Estimación y evaluación de la carga de contaminantes en aguas pluviales urbanas	Sin costo.
<b>PURRS</b>	Primera: 1999 Última: 2006	Modelo de uso de agua en un solo sitio. Destinado para investigación originalmente pero después se incluyeron usuarios comerciales.	~ 800 USD - 8,800 MXN
<b>RUNQUAL</b>	Última: 1999	Estimación de los volúmenes de escorrentía, la calidad del agua y la carga de contaminantes de superficies permeables e impermeables y la calidad del sitio.	Sin costo, incluye código de la fuente
<b>SLAMM</b>	Última: 2019	Instrumento de planificación para carga de contaminantes.	200 USD – 2, 256 MXN
<b>StormTac</b>	Última: 2004	Manejo de cuencas lacustres y diseño conceptual de tratamiento de aguas pluviales	2500 USD – 28,200 MXN
<b>SWMM</b>	Primera: 1970 Última: 2020	Simulación dinámica de las rutas de escorrentía de eventos de lluvia a corto y largo plazo para la evaluación de la cantidad y calidad del agua	Versión USEPA sin costo, incluyendo código
<b>UVQ</b>	Primera: 2000	Integra el ciclo del agua y el reúso de agua. Principalmente utilizado para investigación en la estimación de los flujos y la carga de contaminantes.	Disponible a bajo costo
<b>WBM</b>	Primera: 2004	Grado de planificación y evaluación de la cantidad de agua	Modelo básico: sin costo. Modelo completo: Pago de licencia

El modelo más adaptable a cada caso dependerá de los objetivos que se quieran alcanzar y los recursos disponibles para llevar a cabo el proyecto (Lindgren, 2019). Su aplicación es posible en el estudio de la hidrología e hidráulica de los flujos de escorrentía pluvial en un área determinada. En la hidrología se describe la ocurrencia de agua sobre una superficie, sus características fisicoquímicas y los procesos del ciclo hidrológico involucrados; por su parte la hidráulica se enfoca en el movimiento del flujo del agua y puede ser aplicada en su descripción dentro de un sistema de drenaje.

La aplicación de los modelos se realiza bajo un enfoque y/o mecanismo específico para la representación de los procesos hidrológicos en una cuenca hidrográfica. En este sentido para la incorporación de SUDS a los modelos se requerirá una serie de estrategias/instrumentos que sean funcionales en la representación de los dispositivos SUDS que se quieran evaluar a través de ellos (Her et al., 2017) (Lindgren, 2019).

### 3.3.1.1. Rango de aplicación de los Modelos de SUDS

En aplicación MOUSE y SWMM son los modelos más dinámicos, cuentan con herramientas simplificadas para el análisis, el diseño y el manejo de redes de drenaje (Elliott & Trowsdale, 2007), (Armitage et al., 2014). No obstante, se requiere del conocimiento y entendimiento de las metodologías aplicadas para cada caso. Modelos como StormTac y PURSS cuentan con una aplicación más limitada (Lindgren, 2019).

**Tabla 11.** Usos potenciales de los modelos. ● = uso y ○ = pueden ser usados indirectamente.

Usos Potenciales	Modelo									
	MOUSE	MUSIC	P8 UCM	PURRS	RUNQUAL	SLAMM	Storm Tac	SWMM	UVQ	WBM
Educación										
Investigación	●			●				●	●	
Dimensionado	●	●	●	●	●	●		●	○	●
Planificación del uso del suelo en cuencas y ciudades	●	●	●		●	●	●	●	○	●
Diseño preliminar de controles regionales	●	●	●		●	●	●	●	○	●



Usos Potenciales	Modelo								
Diseño preliminar de subdivisión o sitio	•	•	0	•	0	0	•	•	•
Diseño detallado del sistema de drenaje regional	0						0		
Diseño detallado de subdivisión o sitio	0						0		
Diseño del sitio y selección de materiales	0						0		

Los modelos que restan tienen una aplicación específica y el umbral de aplicación no va más allá de la planificación y/o el diseño preliminar de los sistemas de drenaje y, reflejan la implementación de SUDS en un contexto donde los principios generales de diseño comienzan a convertirse en el medio para la planificación de cuencas y áreas específicas de captación (Elliott & Trowsdale, 2007). MUSIC, P8-UCM y WBM son modelos enfocados principalmente al diseño conceptual a nivel cuencas (Shrivastava, 2016).

### 3.3.1.2. Resolución temporal de los modelos de SUDS

La resolución temporal en los modelos oscila entre promedios anuales y periodos menores a una hora. Modelos que cuentan con una resolución temporal mínima de ejecución tienen la posibilidad de ejecutarse también en periodos más largos de simulación. En la simulación de la distribución de la esorrentía se requieren periodos que van en un orden de segundos, para mantener la estabilidad numérica del modelo. En otros casos como en los balances de agua, la simulación de flujos naturales y cargas o transporte de contaminantes no es necesaria tanta especificidad temporal al momento de la ejecución del modelo.

La mayoría de los modelos tiene la capacidad de realizar simulaciones continuas durante periodos extensos de simulación a excepción de StormTac que su resolución se basa en valores anuales promedio. La factibilidad de estas simulaciones dependerá de las especificaciones espaciales las cuales no deben ser demasiadas (no más de 200 elementos) y de que las restricciones

de estabilidad no requieran de periodos muy pequeños (en el orden de segundos)(Elliott & Trowsdale, 2007).

El pronóstico de los caudales en cuencas pequeñas puede ser realizado por MOUSE, SWMM y MUSIC, este último se limita a la predicción de caudales en áreas pequeñas (0.01 km<sup>2</sup>). Modelos de temporalidad diaria o anual no son apropiados para este propósito (RUNQUAL, SLAMM, StormTac y UVQ). En la incorporación de dispositivos *in situ* es necesario aplicar tiempos mayores a una hora, ya que existe la posibilidad que la escala temporal en la variación de la escorrentía pluvial sea menor a una hora.

Una evaluación sistemática es necesaria en el establecimiento de la resolución temporal al modelo pues la ausencia de estudios limita el uso de periodos cortos en los cuales no se aborda la complejidad de los problemas reales. Sin embargo, también puede ser el caso que no se requiera una especificación temporal para el abordaje de los problemas de gestión(Elliott & Trowsdale, 2007).

#### 3.3.1.3. Representación de la cuenca, redes de drenaje y resolución espacial de SUDS

La resolución espacial de los modelos puede ser representada a través de la distribución de vínculos (nodos) a las redes de drenaje. Cada uno de ellos está asociado a un elemento de captación, de tratamiento o de control de flujo en cuatro de los modelos (MOUSE, MUSIC, SWMM and P8-UCM). Los nodos se vinculan a través de elementos como tuberías o canaletas. Los elementos de captación en MOUSE pueden ser variables y divisibles en superficies con especificaciones en el tipo de uso de suelo y en la carga de contaminantes. Sin embargo, en otros casos solamente se representan como elementos homogéneos en relación con la generación de contaminantes.

En UVQ la cuenca se representa por medio de tres componentes espaciales dando la posibilidad de abordar una amplia gama de escalas y tipologías asociadas a la gestión del agua. Estos modelos cuasi distribuidos permiten la esquematización explícita de la distribución de SUDS en las áreas de estudio. PURRS, RUNQUAL, SLAMM, StormTac y WBM consideran la cuenca en forma unitaria sin red drenaje, a excepción de que en la cuenca pueda diversificar los usos de suelo

(Excepto PURRS). Todos los modelos, a excepción de StormTac, dividen la cuenca en componentes de subcuenca, permeables e impermeables para la generación de escorrentía pluvial.

MOUSE, MUSIC, PURRS, SWMM, UVQ y WBM incluyen reservas de humedad del suelo en los componentes de cuenca, y algunos incluyen el almacenaje subterráneo en cada componente de captación. El número máximo de elementos en los modelos también es de interés para los casos en que se desea incorporar detalles espaciales para el modelado de cuencas de gran extensión o SUDS *in situ*.

En cuanto a la incorporación de elementos de captación, P8-UCM tiene un límite de 192 elementos, MUSIC está limitado a no más de 100 elementos; el nivel de detalle de SWMM y MOUSE se limita a restricciones computacionales, especialmente en simulaciones a largo plazo y en el enrutamiento de inundaciones. UVQ permite simulaciones complejas gracias a su configuración espaciotemporal.

#### 3.3.1.4. Generación de escorrentía y enrutamiento del flujo.

Todos los modelos tienen similitud en la forma en que se genera la escorrentía pluvial de áreas impermeables, y este es el efecto dominante de la urbanización. En áreas permeables se hace uso de métodos convencionales de escorrentía. MOUSE incluye opciones de pérdida inicial y continua mientras que SWMM incluye opciones de infiltración Green-Ampt (Xu et al., 2017). MUSIC aplica cálculos diarios para la determinación de los volúmenes de escorrentía para cada uno de los componentes y, después, la desagregación temporal basada en los patrones de lluvia para hacer una división de cada uno y resulte una distribución de tiempo menor a 24 horas.

No existe una ventaja clara en los métodos de generación de escorrentía sobre otro en relación con los modelos de SUDS. Es muy probable que todos requieran una calibración o la incorporación de indicadores adecuados, y sin excepción presentan interferencias al añadir efectos de la vegetación sobre la humedad de la superficie y la intercepción de volúmenes de agua. Algunos modelos también incluyen componentes de escorrentía base, el cual es importante para los SUDS para mantener los flujos naturales, y que a menudo es uno de sus objetivos.

MOUSE, MUSIC, P8-UCM y UVQ hacen uso de un único depósito lineal de aguas subterráneas concentradas en cada una de las subcuencas mientras que SWMM tiene una zona insaturada adicional y el depósito de aguas subterráneas no es lineal.

En lo referido a la simulación de las rutas del flujo de escorrentía no todos los modelos cuentan con opciones o herramientas que realicen el enrutamiento sobre la superficie desde los puntos de generación y las redes de drenaje. SWMM y MOUSE contienen un conjunto flexible de capacidades de modelado hidráulico, el cual es usado para enrutar la escorrentía por medio de redes de drenaje, canales, unidades de almacenamiento, dispositivos de tratamiento, estructuras de transporte y ruteo en tiempo-espacio (Zhou, 2014).

MUSIC representa el enrutamiento de escorrentía lo más cercano a los puntos de drenaje, y los periodos que no excedan 6 minutos tendrán un efecto atenuante en el flujo en cuencas pequeñas. PURRS no incluye opciones de este tipo, pero se tiene la posibilidad de seleccionar periodos asimilables al tiempo de concentración *in situ* que contemple parcialmente la atenuación de los flujos de escorrentía, siendo importante en la modelación de los caudales de cuencas pequeñas o medianas y que característicamente son relevantes en la incorporación de SUDS. Sin embargo, la resolución temporal en la ralentización de los flujos no es relevante en función de la predicción de los efectos de los SUDS en la carga de contaminantes.

SWMM enruta el flujo entre subáreas dentro de una subcuenca o entre subcuencas y puede ser de gran utilidad en la representación de SUDS, p.ej. al permitir que el flujo de escorrentía en los techos pase a través de una depresión permeable de almacenamiento. A excepción de StormTac, todos los modelos transportan el flujo a través de dispositivos específicos (Elliott & Trowsdale, 2007) y así mismo hacen uso de un procedimiento simple de enrutamiento (Level-Pool Routing) para el establecimiento de los flujos de escorrentía a través de dispositivos en cada uno de los modelos, los cuales pueden variar en ciertas especificaciones como los tipos de flujo, las tasas de descarga y las dimensiones del dispositivo de enrutamiento.

MUSIC permite que el flujo no se incorpore a los dispositivos SUDS, pero la configuración de los depósitos y de las salidas de flujo deben ser respectivamente verticales y simples. En cambio, SWMM y MOUSE los flujos de salida son controlados por medio del volumen de agua. MUSIC, PURRS y UVQ cuentan con la posibilidad de disponer de volúmenes de agua para el riego o uso doméstico en función del tiempo, esta capacidad es fundamental en la simulación de SUDS.

Especificando la representación de SUDS, el enrutamiento dinámico de las inundaciones no es necesario, a excepción de los tramos más bajos de una cuenca donde los efectos de remansos son más probables o en su caso para las instalaciones de detención fuera de línea. En función de esto, MOUSE y SWMM cuentan con la capacidad de establecer rutas hidráulicas de ondas dinámicas y de incorporar métodos de enrutamiento más simples, como enrutamiento de olas cinemáticas o enrutamiento hidrológico.

### 3.3.1.5. Incorporación de elementos y prácticas SUDS

Los modelos tienen la capacidad de incorporar SUDS. La mayoría los representa, aunque no atiendan específica o explícitamente a su tipología (**Tabla 12**). Es posible utilizar una amplia gama de modelos hidrológicos e hidráulicos para la simulación de las implicaciones hidrológicas de SUDS, principalmente las del flujo de tormentas, que son funcionales en la predicción de los efectos de la modificación de la permeabilidad en la superficie del suelo (Lindgren, 2019).

**Tabla 12.** Dispositivos SUDS y medidas incluidas en la interfase de los modelos seleccionados.

Medidas	Modelo									
	MOUSE	MUSIC	P8-UCM	*PURRS	RUNQUAL	SLAMM	StormTac	SWMM	UVQ	*WBM
Reducción de la impermeabilidad	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Estanques y humedales	•	•	•		•	•	•	•	•	•
Protección del suelo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	•
Reducción de la generación de contaminantes	0	0	0		0	0	0	0	0	
Zanjas de infiltración	0	•	•	•	•	•		0	•	•
Tanques de detención In-Situ	•	•	•	•				•	0	0
Cunetas de infiltración	•	•	•			•	•	•		•
Transporte de escorrentía		0		•				•	•	•
SCALL	0	•	0	•				0	•	

Sistemas de biorretención	O	●		O	O	●
Pavimentos permeables	O	O		O		O
Cubiertas verdes		O		O		●

● = el modelo se refiere específicamente a las medidas señaladas y O = el modelo no se refiere específicamente a las medidas señaladas, pero es posible su modelado. Los modelos con asterisco (\*) no abordan la calidad del agua.

Los modelos aplicados a la evaluación de la calidad del agua pueden representar la reducción de la carga de contaminantes con la alteración de las concentraciones, la modificación o variación de los usos de suelo y/o el rendimiento de las tormentas. Sin embargo, ningún modelo atiende la reducción de contaminantes directamente debido a que hacen uso de prácticas de reducción o control de emisiones en la fuente. Por lo tanto, es posible que en algunos casos no se pueda simular explícitamente la generación o entrada de contaminantes a los dispositivos SUDS.

En la selección de un modelo adecuado a cada caso, la especificación de las rutas del flujo y el tratamiento de los contaminantes son dos de los factores de mayor importancia a considerar en la implementación de SUDS a los modelos. La incorporación de elementos tales como humedales o estanques de retención/atenuación es posible en todos los modelos a excepción de PURRS, reflejando el uso generalizado de este tipo de SUDS.

En este sentido, los elementos de infiltración pueden ser considerados como los más adecuados para la representación de SUDS. Sin embargo, en SWMM y MOUSE es necesario representar la infiltración a través de salidas de flujo en tanques de almacenamiento y no como infiltración en suelo; en la **Tabla 12**, siete de los modelos se pueden añadir tanques de detención en sitios específicos, pero en P8-UCM, RUNQUAL, WBM y UVQ sólo serían adecuados para evaluar los efectos del volumen en los tanques de almacenamiento y no para las tasas de flujo (Shrivastava, 2016).

MUSIC aborda la calidad de agua, la infiltración, el almacenamiento y los aspectos hidráulicos de cunetas de infiltración, mientras que WBM y SLAMM solo las funciones de infiltración (Shrivastava, 2016). En cuanto a los aspectos hidráulicos pueden ser modelados a través del establecimiento de enlaces en P8-UCM, MOUSE y SWMM, considerando las funciones de infiltración como salidas de flujo en tuberías.

El transporte de escorrentía pluvial de áreas impermeables hacia permeables se puede representar explícitamente en cuatro modelos, y solamente en dos de ellos se consideran la calidad

del agua (Elliott & Trowsdale, 2007). MUSIC, P8-UCM, SLAMM y RUNQUAL representan el transporte a través del establecimiento de límites o mediante la incorporación de dispositivos SUDS (Shrivastava, 2016). En otros modelos se puede representar de tal forma en la que se reduzcan las áreas impermeables.

MUSIC, PURRS y UVQ tienen la capacidad de configurar tanques de lluvia o sistemas de captación, PURRS se enfoca en los tanques de almacenamiento, mientras que UVQ se centra en los aspectos del balance hídrico más que en los caudales. Posiblemente el uso de otros modelos para la representación de SCALLS se realice mediante dispositivos de detención, estableciendo tasas de extracción constante en la simulación.

Los dispositivos enfocados en la biorretención o en la filtración se incluyen solamente en MUSIC y WBM, donde el segundo se limita a los aspectos de la calidad del agua. Otros modelos son más flexibles como MOUSE y SWMM en los cuales es posible modelar aspectos de flujo de forma indirecta utilizando dispositivos de almacenamiento e infiltración. Los SUDS de biorretención, que se basan en la infiltración en el suelo, podrían modelarse como dispositivos de infiltración sin considerar el drenaje subterráneo o la evapotranspiración significativa (Zhou, 2014).

En ninguno de los modelos se incluyen los pavimentos permeables de manera explícita, pero en MOUSE, MUSIC, SWMM y WBM podrían ser representados con el ajuste de los parámetros de una subárea permeable.

En el caso de las cubiertas verdes solo pueden ser especificados en el modelo WBM. Sin embargo, en MUSIC y SWMM podrían ser representados indirectamente con el cambio de las propiedades del suelo y subsuelo en cada una de las áreas de implementación. Este procedimiento limitado de las cubiertas verdes refleja su introducción reciente a las estrategias y dispositivos SUDS para la gestión de la escorrentía pluvial.

### 3.3.2. Metodología de aplicación de los modelos de SUDS

Este apartado muestra la descripción metodológica de dos modelos, MOUSE que se ejecuta a través de su nueva versión MIKE URBAN, y SWMM, desarrollados respectivamente por el Instituto Danés de Hidrología y por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA-US, por sus siglas en inglés). Los modelos han sido seleccionados por sus características, que, aunque no se siguió específicamente su metodología, son acoplables al modelo desarrollado en esta investigación, esto debido a los diversos métodos en los que se basan para el modelado de la dinámica del agua sobre la superficie en áreas específicas.

#### 3.3.2.1. MIKE URBAN – MOUSE

MIKE URBAN es un modelo de aguas pluviales, ejecuta simulaciones en sistemas de recolección de agua (SC) y en sistemas de distribución de agua (SD) (Danish Hydraulic Institute - DHI, 2019; Lindgren, 2019). Las simulaciones hidráulicas se realizan con motor de cálculo MOUSE o con SWMM. Hace uso de administradores de modelos y bases de datos para la simulación y el almacenamiento de los datos de modelado hidráulico e hidrológico. El modelo ofrece lo siguiente:

- Un modelo de construcción de redes y gestión de agua basado en datos SIG
- Motores de simulación hidráulica e hidrológica
- Integración de la evaluación de la calidad y los flujos de agua, control en tiempo real y simulación de golpe de ariete (distribución de agua).
- Diseño dinámico de tuberías y estadística a largo plazo de los sistemas de recolección.
- Mapeo temático y visualización dinámica de los resultados

La estructura modular de MIKE URBAN sigue el siguiente esquema (**Figura 18**) e involucra el almacenamiento de datos SIG a través de una GeoDatabase, cuenta con editores de entrada de datos para la simulación e incluye la selección del motor de cálculo (MOUSE/SWMM) más adecuado para la modelación y cuenta asimismo con un módulo común de datos para los sistemas de recolección y distribución de agua.



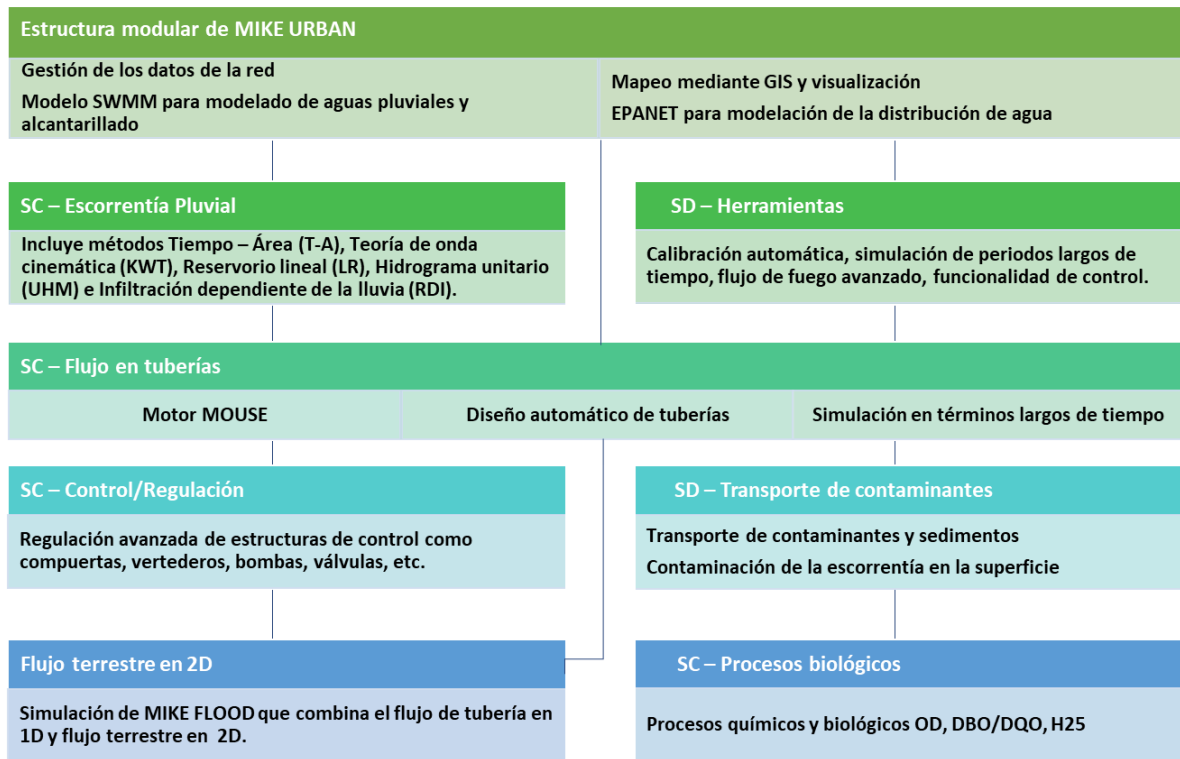


Figura 18. Estructura modular de MIKE URBAN. Fuente: (Danish Hydraulic Institute - DHI, 2019)

La simulación de SC en MIKE URBAN consta de dos pasos: en el primer paso se realiza una simulación de la escorrentía pluvial sobre la superficie y en el segundo se realiza una simulación de las redes de tuberías (Lindgren, 2019). Existen generalidades en la incorporación (entrada) de datos para cada uno de los métodos de escorrentía superficial. En primer lugar, se establece un sistema de coordenadas geográficas a través de un sistema de información geográfica (SIG) para especificar la localización del área de estudio, para después esquematizar un área de captación dentro del modelo (Danish Hydraulic Institute - DHI, 2019).

### 3.3.2.2. Storm Water Management Model (SWMM)

Es un modelo dinámico que simula la cantidad y calidad escorrentía pluvial de eventos únicos de lluvia y/o de eventos continuos en áreas urbanas y suburbanas a través de una serie de componentes ambientales (Huber et al., 2015). Los módulos de escorrentía pluvial se operan en una

serie de subáreas de cuenca en donde se recibe la precipitación y generan escurrimientos y cargas de contaminantes; las cuales se transportan por sistemas de drenaje. En SWMM se busca la cantidad y calidad de los escurrimientos pluviales generados en cada subcuenca, y las tasas, la profundidad de flujo y la calidad del agua en cada tubería durante los periodos de simulación que se conforma por múltiples pasos de tiempo (Rossmann & Huber, 2016).

El modelo conceptualiza los elementos de un sistema de drenaje urbano convencional como una serie de flujos de agua y materiales entre diferentes componentes ambientales importantes; entre estos se incluyen: El componente atmosférico, de la superficie terrestre, de la subsuperficie y de transporte. En SWMM tiene la capacidad de modelar cualquier configuración de sistemas de captación de aguas pluviales, tanto en sistemas de drenaje sanitario como combinados, así como en sistemas de captación y de transporte natural.

La **Tabla 13** muestra los principales elementos físicos que conceptualiza SWMM en la simulación del sistema de drenaje urbano real. Se presenta una breve descripción de sus propiedades y funciones.

**Tabla 13.** Elementos físicos de modelado de SWMM (Adaptado de:(Rossmann & Huber, 2016)).

<b>Categoría</b>	<b>Tipo de componente</b>	<b>Descripción</b>
<b>Hidrología</b>	Pluviómetro	Fuente de datos de precipitación.
	Subcuenca	Área de captación de la precipitación, donde se genera escorrentía pluvial.
	Acuífero	Área del subsuelo que recibe infiltración de la subcuenca sobre ella e intercambia el flujo de agua subterránea con un nodo del sistema de conducción.
	Unidad hidrográfica	Función de respuesta para describir la cantidad de entrada de agua al alcantarillado a lo largo del tiempo por unidad de lluvia.
<b>Hidráulica</b>	Unión	Punto del sistema de transporte donde se conectan los conductos entre sí con un volumen insignificante de almacenamiento.
	Desagüe	Punto final del sistema de distribución donde el agua se descarga a un cuerpo receptor.
	Divisor	Punto del sistema de transporte donde la entrada se divide en dos conductos de salida según una relación conocida.
	Unidad de almacenamiento	Un estanque, lago, embalse, o tanque de almacenamiento.

<b>Categoría</b>	<b>Tipo de componente</b>	<b>Descripción</b>
	Conducto	Tubería de transporte de agua de un nodo del sistema a otro.
	Bomba	Instrumento que eleva la altura hidráulica del agua.
	Válvula	Orificio o salida que se utiliza para dirigir y regula los flujos entre dos nodos del sistema de transporte.
<b>Calidad de agua</b>	Contaminante	Sustancia que pueden acumularse y lavarse de la superficie del área o instrucciones directamente en el sistema de transporte.
	Uso de suelo	Funciones que describen la acumulación y el arrastre de contaminantes sobre la superficie.
<b>Tratamiento</b>	Control de SUDS	Control en dispositivos que se utilizan para reducir la escorrentía superficial mediante una mayor infiltración.
	Función de tratamiento	Describe la reducción de la carga de contaminantes en un nodo del sistema de transporte en función de la concentración, el caudal, el volumen de agua, etc.
<b>Datos</b>	Curva	Función tabular que define la relación entre dos cantidades (p.ej. el caudal y la altura hidráulica para una bomba, etc.)
	Series de tiempo	Función tabular que describe la variación de cierta cantidad con el tiempo.
	Patrón de tiempo	Conjunto de factores que se repite durante un período de tiempo.
	Reglas de regulación/control	Declaraciones IF-THEN-ELSE que determinan cuándo se toman acciones de control específicas.

La **Figura 19** muestra el proceso hidrológico de modelación en SWMM y esquematiza sus capacidades a través de la aplicación de los elementos anteriormente expuestos y por medio del establecimiento de los vínculos o enlaces que los unen (Rossmann & Huber, 2016). En el cual se incluyen:

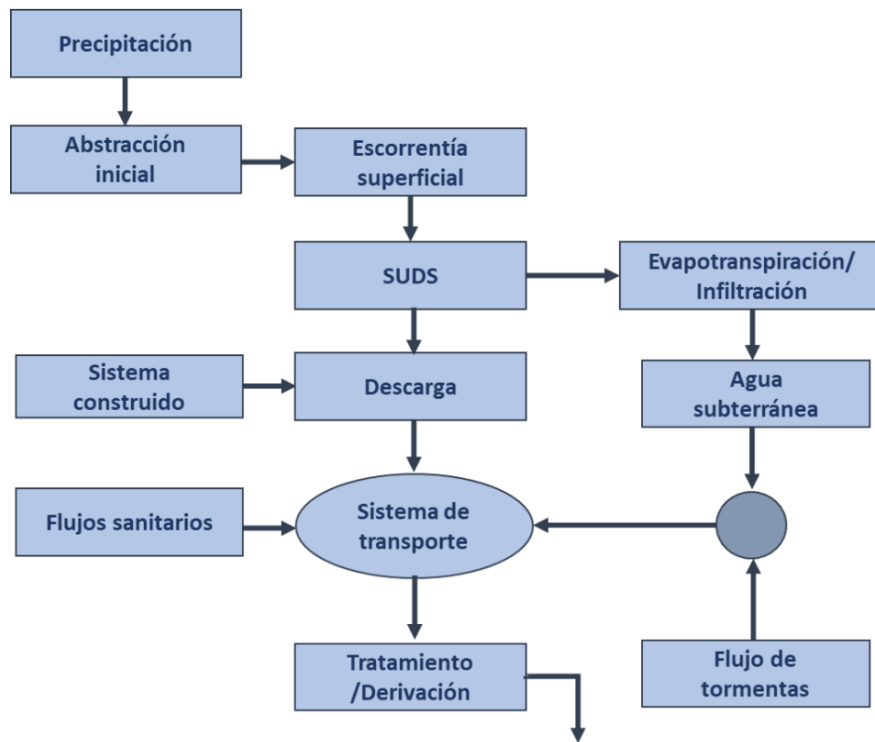


Figura 19. Proceso de modelado de SWMM. Fuente:(Huber et al., 2015)

- Precipitaciones variables en el tiempo
- Evaporación y agua estancada
- Intercepción de la precipitación pluvial (abstracción inicial)
- Infiltración de agua en capas del suelo insaturadas
- Percolación de agua en acuíferos
- Intercambio de flujo entre los acuíferos y el sistema de drenaje
- Enrutamiento no lineal del almacenamiento del flujo superficial
- Infiltración y evaporación de los escurrimientos captados por SUDS

La variabilidad espacial en todos estos procesos se alcanza dividiendo una determinada área de estudio en cuencas o subcuencas y cada una de estas tiene características específicas de suelo o superficie y el flujo superficial puede producirse entre cuencas o entre los puntos de entrada al sistema de drenaje (Rossmann & Huber, 2016).

SWMM contiene un conjunto flexible de herramientas de modelación hidráulica para el análisis del flujo de la escoorrentía pluvial y los aportes externos de caudal a través de una red de tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento, tratamiento y una serie de estructuras; y tiene la

capacidad de estimar la producción y evolución de cargas de contaminantes asociadas al arrastre superficial de sustancias por la escorrentía pluvial (Huber et al., 2015; Rossmann & Huber, 2016).

#### 4. Análisis Multi-Objetivo para determinar la combinación óptima de sistemas urbanos de drenaje sostenible. Caso de estudio: Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

##### 4.1. Introducción

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) han adquirido gran importancia al ser considerados como soluciones y/o sistemas eficientes para la gestión óptima de los recursos hídricos en áreas urbanas. Mientras que los sistemas de gestión tradicional tendían a captar rápidamente la escorrentía pluvial para ser tratada y descargada a los cursos naturales de agua, los SUDS representan un nuevo paradigma en la búsqueda de la gestión local de la escorrentía pluvial. Los sistemas comprenden una variedad de tecnologías y enfoques como cubiertas verdes, pavimentos permeables, zanjas de infiltración, áreas de detención, jardines de lluvia o inundables, sistemas de captación de agua de lluvia, etc.

A pesar de la cantidad de investigaciones que abordan los diversos enfoques de SUDS, quedan algunas incógnitas por resolver. En primer lugar, no se ha discutido en gran medida una definición específica de los objetivos de diseño de los SUDS que, en la mayoría de los casos, no va más allá de simples metas como la minimización de los flujos de escorrentía pluvial, la maximización de la recarga de los acuíferos o en minimizar las funciones de los costos de implementación y operación.

Desde un contexto más teórico, el diseño debe ser considerado en estrecha relación con el conjunto de variables involucradas en todo sistema hidrológico ya que los SUDS alteran varios de los procesos del sistema. P.ej. la detención de la escorrentía pluvial por cualquier tipo de SUD reduce la descarga superficial a los cursos naturales de agua que, aunque es deseable que se encuentren por encima de ciertos niveles, limita el caudal, afectando los caudales ecológicos. Por su parte, la infiltración de la escorrentía pluvial almacenada en suelos a través de SUDS sin considerar la evapotranspiración podrá provocar pérdidas de agua por percolación profunda; y de manera similar,

los criterios de diseño de los sistemas actuales han sido basados en los estándares tradicionales de drenaje.

Los enfoques de diseño de SUDS generalmente buscan imitar la hidrología del estado previo al desarrollo (Capítulo 3), estableciendo límites de flujo máximo y volumen de escorrentía pluvial para diferentes eventos de lluvia. Conforme a estas directrices, las investigaciones destinadas a la definición de estrategias de planificación general o de diseño específico de SUDS, frecuentemente hacen uso de eventos de lluvia extremos para el análisis de su comportamiento. Ciertos autores han discutido la validez de usar dichos eventos para el diseño de SUDS basándose en el hecho de que tales instalaciones no están destinadas a la captación de escorrentía pluvial con fines de seguridad sino a la gestión de la escorrentía pluvial (Zubelzu et al., 2019).

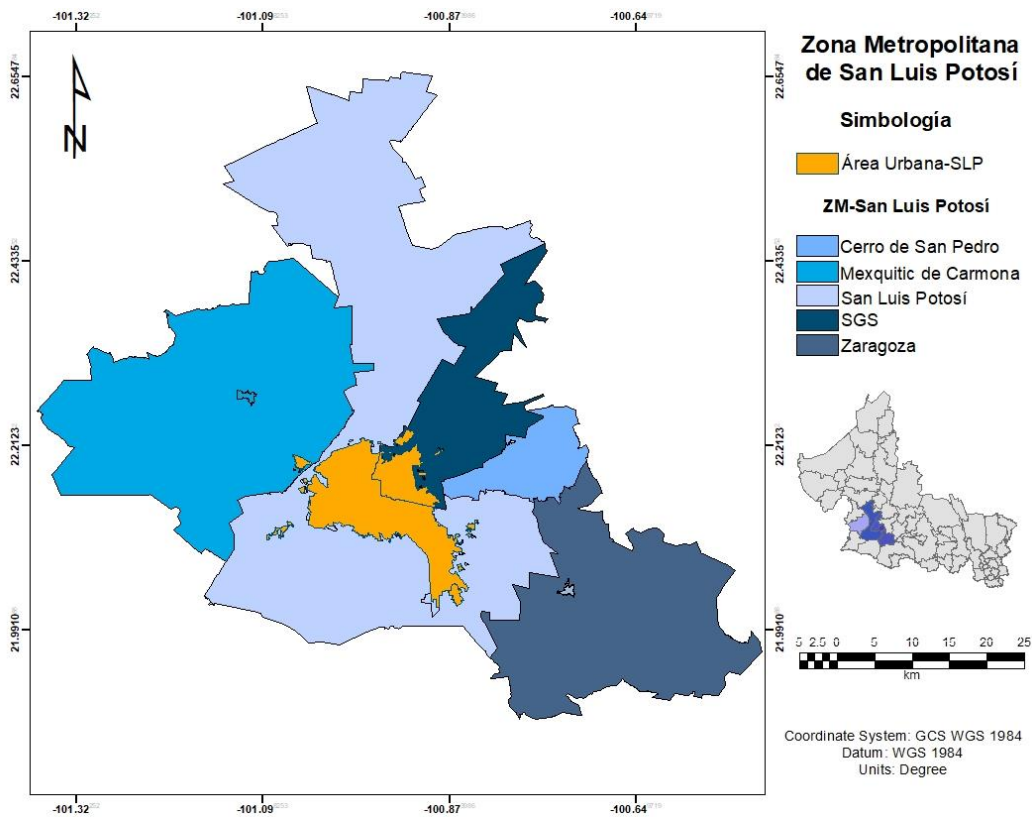
Las investigaciones enfocadas a encontrar la combinación óptima de SUDS en la etapa de planificación suelen decidir entre un conjunto de alternativas centralizadas que abarcan un tipo reducido de SUDS cuya configuración es previamente definida como en el caso de (Bai, Li, Zhang, Zhao, & Zeng, 2019). Hacen falta estudios que aborden el diseño de SUDS que incorporen todas las combinaciones posibles e inclusive aquellas en las que los SUDS están ausentes, para la deducción de la solución óptima al sistema de drenaje.

En este capítulo se propone un método para determinar la combinación óptima de SUDS, a escala ciudad, que abarca el sistema hidrológico completo. Se toma en cuenta un conjunto de categorías de SUDS que comprenden infraestructuras destinadas a detener y reutilizar localmente la escorrentía pluvial y la infiltración de la precipitación. Para esto, se modela la dinámica hidrológica con un balance hídrico y se incorpora a un proceso multicriterio en el cual se abarcan objetivos económicos e hidrológicos para la integración del estudio.

## 4.2. Área de Estudio: Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

### 4.2.1. Generalidades

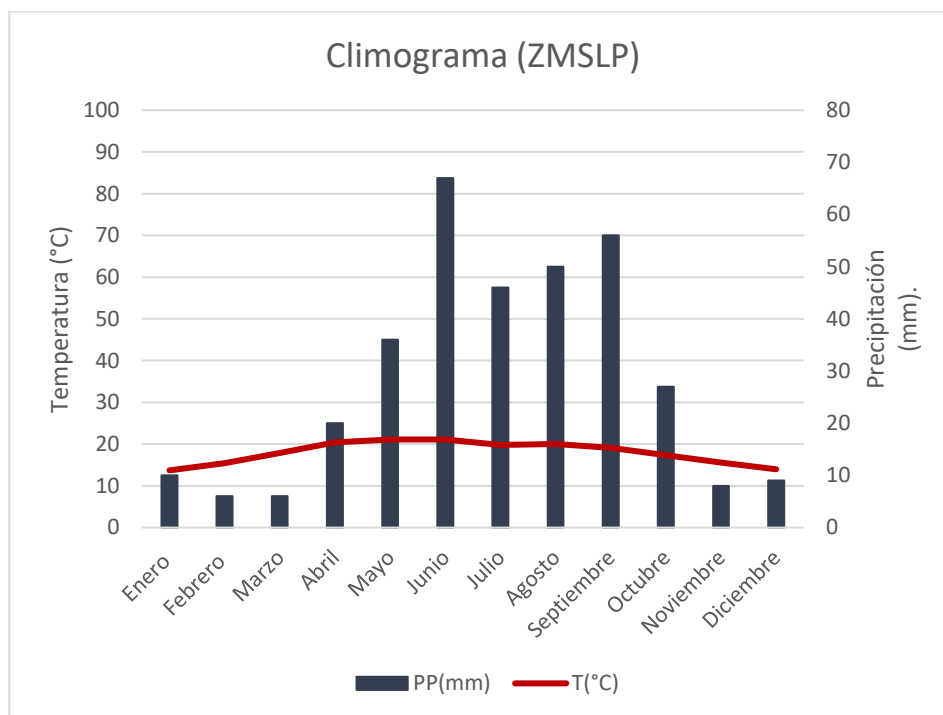
La Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP) integrada principalmente por la superficie urbana de tres municipios del Estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, y Zaragoza (SEDATU et al., 2015), presenta una conurbación de seis unidades administrativas, las tres mencionadas con anterioridad, Villa de Reyes, Cerro de San Pedro y Mezquitic de Carmona (Matínez Torres, 2018) (**Figura 20**). Se encuentra localizada en la altiplanicie mexicana entre la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental con elevaciones promedio de 1,860 msnm y con una extensión de 2,409.2 km<sup>2</sup>.



**Figura 20.** Localización de la ZMSLP. (Fuente: Elaboración propia).

La situación geográfica del área de estudio influye en el hecho que las condiciones climáticas de la región sean de carácter árido, ya que los sistemas montañosos en los que se comprenden actúan como barrera para los vientos húmedos al detener la humedad proveniente del golfo de México (PCPE, 2007).

El clima de la región es BS1Kw, semiseco templado, con verano cálido, en el que el régimen de lluvias alcanza en promedio 400 mm anuales, específicamente en el periodo comprendido entre mayo y octubre, el mes más seco presenta un valor de 6.1 mm y el más húmedo de 69.7 mm, marzo y junio respectivamente. Sin embargo, existen condiciones climáticas particulares para cada localidad comprendida en la ZMSLP. De tal manera se establece que la temperatura promedio anual varía de 17.4 – 21°C entre los meses de enero y mayo respectivamente (**Figura 21**).



**Figura 21.** Climograma de la ZMSLP. Fuente: Elaboración propia

En lo que respecta a la evaporación, se presentan valores anuales que llegan a los 2,038.7 mm. La humedad relativa promedio anual es de 31 %; en el transcurso del año es mayor de junio a diciembre, ya que alcanza niveles de 44 % de junio a diciembre y la menor humedad que es de 18 % se registra en el periodo de enero a mayo; y justo en abril se presenta el nivel mínimo de 18 % (CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2018).



## 4.2.2. Hidrología

### 4.2.2.1. Hidrología superficial

La ZMSLP a su vez se ubica en la región hidrológica No. 37 “El Salado”, fisiográficamente es caracterizada por un conjunto de cuencas endorreicas situadas en la altiplanicie septentrional (Mesa del Centro) en toda la porción noroccidental del Estado de San Luis Potosí; su extensión dentro del territorio potosino corresponde al 54.2% de la superficie total.

Los principales escurrimientos que ocurren son los Río Santiago y Río Española que cruzan el área urbana de la ZMSLP de Noreste a Sureste. Se dispone de cuatro presas para el control de las avenidas: San José, El Peaje, El Potosino y Cañada del Lobo (**Tabla 14**). Las tres primeras son utilizadas como fuentes de abastecimiento superficial, correspondiente al 8% de abastecimiento total.

Tabla 14. Aprovechamientos superficiales.

Nombre	Corriente Superficial	Área Drenada km <sup>2</sup>	Capacidad en Mm <sup>3</sup> del Almacenamiento	
			Potencial	Actual
P. San José	Río Santiago	265	8.2	4.56
P. El Peaje	A. Grande o Azul	81	8.0	6.65
P. El Potosino	Río el Potosino	57	4.0	3.58
P. Cañada del Lobo	Río Española	13	0.8	0.8

La disponibilidad total de agua superficial almacenada en presas para abastecer la ZMSLP, según INTERAPAS en su informe del 2018; el porcentaje de almacenamiento existente en las presas al 31 de diciembre del 2018 fue de: San José al 97.2%; el Potosino al 85.1 % y El Peaje al 39.0%, para un total de 10.182 Mm<sup>3</sup>.

En lo que refiere a las precipitaciones pluviales durante el año de 2018, fue de 502.2 mm, el cual se distribuye en 45% de la precipitación durante el primer semestre del año, y el restante en el segundo; es observable que los meses donde la precipitación es menor fueron marzo con una precipitación nula y julio con 2.1 mm, valor considerado bajo en comparación con los últimos 16 años. Los meses que registraron mayor precipitación fueron junio, septiembre y mayo, con valores

de 119.1 mm, 97 mm y 74.9 mm, respectivamente y son correspondientes al 56% de la precipitación anual (Interapas, 2018).

El aprovechamiento superficial contempla la cobertura de objetivos específicos, tales como:

- I. La optimización del uso real y efectivo del escurrimiento;
- II. El uso del escurrimiento para el equilibrio y/o recuperación del acuífero.

Objetivos que tienen la finalidad de liberar volúmenes de extracción, conforme su equivalente adicional de agua superficial aprovechable (PCPE, 2007). Al contar con volúmenes óptimos almacenados supondría una mayor recarga y una mejor cobertura de agua potable para la ZMSLP.

La existencia de aprovechamientos hidráulicos de agua superficial aún tiene la opción de mejorar su funcionalidad a través de los enfoques planteados en la sección 3; definiendo nuevos proyectos enfocados a la rehabilitación, restructuración del área urbana y, a la generación de nuevos sistemas de gestión y así mismo ayudando al establecimiento de nuevas políticas públicas.

#### 4.2.2.2. Hidrología subterránea

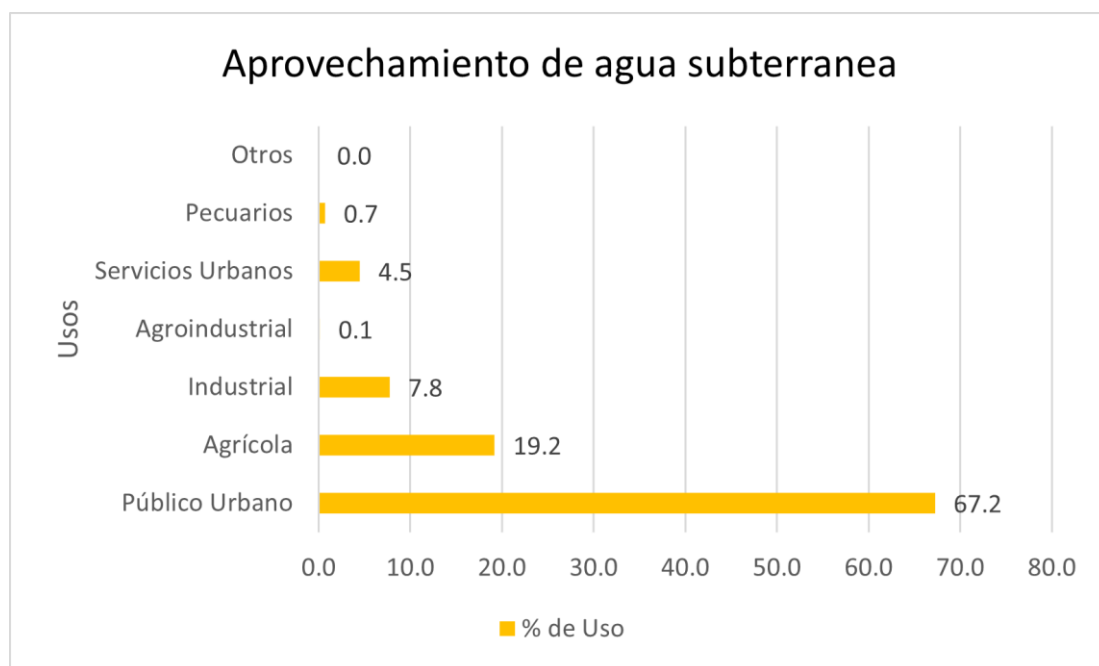
El acuífero 2411 San Luis Potosí, según la actualización del Diario Oficial de la Federación el 4 de enero del 2018, localizado en la parte suroeste del Estado de San Luis Potosí abastece cerca del 67% de la población del Estado y cubre un área aproximada de 1,980 Km<sup>2</sup> abarcando en su mayoría a la ZMSLP. La extracción del acuífero asciende a los 125.6 Mm<sup>3</sup> anuales; y se encuentra distribuida entre las extracciones al acuífero superior con un valor de 4.9 Mm<sup>3</sup> y al inferior con un valor de 120 Mm<sup>3</sup> anuales; y a su vez se distribuye en varios usos (**Tabla 15**).

**Tabla 15.** Extracción de agua por categorías (Mm<sup>3</sup>/año).

Usos	Acuífero superior	Acuífero Inferior	Totales
Público Urbano	0.167	84.389	84.419
Agrícola	3.64	20.499	24.084
Industrial	0.096	9.650	9.746
Agroindustrial	0.157	0.027	0.184
Servicios Urbanos	0.452	5.198	5.650
Pecuarios	0.25	0.661	0.911

Otros	0.18	3	0.006
<b>Subtotales</b>	<b>4.969</b>	<b>120.609</b>	<b>125.578</b>

Los valores de agua subterránea muestran que el 67.2% del agua extraída se destina al abasto público urbano, seguido del uso agrícola 19.2%, industrial ~ 8%, servicios urbanos 4.5% y uso pecuario 0.7%; El 96.04 % del volumen total es aportado por el acuífero inferior, mientras que el 3.96% restante por el acuífero superior (**Figura 22**).



**Figura 22.** Aprovechamiento de agua subterránea por usos. Fuente: Elaboración propia.

La localización del acuífero bajo el área urbana condiciona su afectación al estar directamente relacionada a la dinámica y al crecimiento urbano, pues disminuye las posibles zonas de recarga, aumenta la extracción y los riesgos de contaminación son mayores. Por cada hectárea que se ocupa en forma urbana en el Valle de San Luis Potosí, la recarga del acuífero local pierde 402.5 m<sup>3</sup>/año. Si la hectárea que se ocupa se localiza en la sierra de San Miguelito, la pérdida de recarga alcanza 453 m<sup>3</sup> en promedio cada año (Guevara-Gasca, 2007).

#### 4.2.2.3. Balance de aguas subterráneas del acuífero de San Luis Potosí (2411).

La ecuación general de balance, conforme a la ley de la conservación de la masa:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \nabla \text{Almacenamiento}$$

En su aplicación al estudio del acuífero, las entradas equivalen a la recarga total, las salidas a la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento:

$$\text{Recarga total (E)} - \text{Descarga total (S)} = \nabla \text{Almacenamiento}$$

En el acuífero superior no existen niveles someros que constituyan salidas por evaporación, entonces:

$$\text{Salidas} = \text{Bombeo (b)} + \text{Descarga al acuífero inferior (Sh)}$$

$$b = 5 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

$$Sh = \text{Transmisividad (T)} \cdot \text{Gradiente Hidráulico (i)} \\ \cdot \text{Ancho de la sección transversal (a)}$$

$$Sh = 4.03 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

$$S = b + Sh = 5 \text{ Mm}^3/\text{año} + 4.0 \text{ Mm}^3/\text{año} = 9.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

Para el acuífero inferior se considera:

$$\text{Bombeo (b)} \approx \text{Recarga (R)} \approx = 30.6 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

Entonces la recarga total al sistema acuífero se calcula:

$$\text{Recarga total} = 9.0 \text{ Mm}^3 + 30.6 \text{ Mm}^3 \approx 40 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

Los valores obtenidos del sistema acuífero son los siguientes:

- Bombeo del acuífero superior = **5.0 Mm<sup>3</sup>/año**
- Bombeo del acuífero inferior = **120.6 Mm<sup>3</sup>/año**
- Bombeo del sistema = **125.6 Mm<sup>3</sup>/año**
- Coeficiente de Almacenamiento (S) = **0.06**

$$\text{Volumen Drenado} = (707.973 \text{ m}^3)(0.06) = 42.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

$$\text{Recarga total} = \text{Bombeo} + \Delta V = 120.6 \text{ Mm}^3/\text{año} + (-42.5 \text{ Mm}^3/\text{año}) \\ = 78.1 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

El balance geohidrológico del acuífero profundo de San Luis Potosí se representa de la siguiente manera:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \pm \text{Cambio de almacenamiento } (\Delta S \cdot S)$$

$$\text{Coeficiente de almacenamiento (S)} = \mathbf{0.06}$$

$$E = S \pm \Delta V$$

$$\Delta V = -\mathbf{42.5 Mm^3/año}$$

$$E = 120.6 - 42.5 = \mathbf{78.1 Mm^3/año}$$

$$E = \mathbf{78.1 Mm^3/año}$$

#### 4.2.2.4. Disponibilidad y aprovechamiento del agua en el acuífero San Luis Potosí (2411)

La disponibilidad media anual del agua subterránea es obtenida a través del procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana **NOM-011-CONAGUA-2015**; establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas establece la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} &\text{Disponibilidad media anual subterránea en una unidad hidrologica} \\ &= \text{Recarga total media anual} - \text{Descarga natural comprometida} \\ &\quad - \text{Volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito al REPDA} \end{aligned}$$

#### **Recarga total media anual**

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida, que para el acuífero San Luis Potosí es de **78.1 Mm<sup>3</sup>/año**.

#### **Descarga natural Comprometida**

La descarga natural comprometida se cuantifica con la medición del volumen de agua procedente de manantiales o del caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, aprovechados

y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben ser sostenidas para no afectar a las unidades hidrogeológicas adyacentes. Para el acuífero San Luis Potosí, la descarga natural comprometida es considerada como nula.

### Volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito al REPDA

El volumen anual concesionado por el acuífero de San Luis Potosí, conforme a los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), perteneciente a la Subdirección General de Administración del Agua, al 30 de abril de 2002 es de **149,346,618 m<sup>3</sup>/año**.

### Disponibilidad de agua subterránea

La disponibilidad de agua subterránea, conforme a la metodología establecida en la **NOM-011-CONAGUA-2015**, se obtiene de restar el volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionadas e inscritas en el REPDA:

$$78,100,000 - 0.0 - 149,346,618 = -71,246,618$$

La cifra de: **-71,246,618** indica que no existe volumen disponible para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica denominada acuífero San Luis Potosí (**Tabla 16**)(CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2018).

**Tabla 16.** Disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero de San Luis Potosí (CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2018)

Clave	Acuífero	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		(Mm <sup>3</sup> )					
<b>2411</b>	San Luis Potosí	78.1	0.0	153.42	125.6	0.0	-75.32

R: Recarga media anual, DNCOM: descarga natural comprometida, VCAS: volumen concesionado de agua subterránea, VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos, DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea.

La relación Recarga-Descarga del acuífero presenta un déficit en el balance geohidrológico (sobreexplotación) ocasionando la extracción de agua del almacenamiento del acuífero, en particular el correspondiente al acuífero profundo en medio granular. La demanda del agua seguirá creciendo conforme se incremente la dinámica poblacional y económica, si no se toman acciones

técnicas y administrativas en tema del agua, los volúmenes necesarios de agua superarán por mucho los que se encuentran disponibles y el déficit aumentará (Guevara-Gasca, 2007).

### Datos de consumo en la ZMSLP

El Organismo Operador INTERAPAS (hasta el 31 de diciembre del 2018) presta los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a un total de 372,868 usuarios, de los cuales 271,518 (72.81%) pertenecen al municipio de San Luis Potosí; 100,594 (26.97%) a Soledad de Graciano Sánchez y 756 (0.22%) al municipio de Cerro de San Pedro. El total de los usuarios, 24,221 (66.30%) cuentan con servicio medio y 125,647 (33.69%) usuarios con cuota fija (Tabla 17) (Interapas, 2018).

Tabla 17. Usuarios del organismo operador de aguas en la ZMSLP.

Municipio	Tipo de servicio		Total (habitantes)
	Medido	Fijo	
San Luis Potosí	193,554	77,964	271,518
Soledad de Graciano Sánchez	53,353	47,241	100,594
Cerro de San Pedro	314	442	756

Durante el periodo 2018 se distribuyeron 107,863,018 Mm<sup>3</sup> de agua, de los cuales 79,759,750 Mm<sup>3</sup> (74%) corresponden al sistema de agua subterránea compuesta por 114 pozos; 85 son de San Luis Potosí, 27 de Soledad de Graciano Sánchez y 2 de Cerro de San Pedro; mientras que los 28,103,268 Mm<sup>3</sup> (26%) restantes corresponden al sistema superficial conformado por los embalses: El Peaje, El Potosino, San José y El Realito (Interapas, 2018).

#### 4.2.2.5. Saneamiento y tratamiento de aguas residuales de la ZMSLP

El sistema de drenaje en la ZMSLP es de tipo combinado; residual doméstica e industrial y, en temporadas de lluvia se agrega el agua de escurrimiento pluvial. Del volumen total del agua residual, el 86% es de aportación doméstica, y el 14% proviene de descargas industriales (Guevara-Gasca, 2007). El agua residual es desalojada hacia los límites urbanos a través de tres cuencas sanitarias: Norte, El Morro y Tanque Tenorio. La cobertura del alcantarillado es del 94.5%, en total equivale a

una longitud de 2,753 km de redes de atarjeas y drenaje sanitario, en donde más del 50% tienen un uso aproximado de más de 60 años de servicio (Interapas, 2013).

En 2018 el caudal tratado por las PTAR en la ZMSLP ascendía a los 1,575.7 l/s, representando el 71.2 % de las aguas residuales tratadas a través de las PTAR presentadas en la **Tabla 18**.

**Tabla 18.** Cobertura de las PTAR en la ZMSLP. Fuente: (CONAGUA, 2015)

<b>PTAR</b>	<b>Capacidad Instalada (l/s)</b>	<b>Caudal Tratado (l/s)</b>	<b>Estatus Actual</b>
Tangamanga I-B	110	110	Activa
Norte - Tangamanga II	400	240	Activa
Club de Golf	40	40	Activa
Agua Tratada del Potosí	50	30	Activa
Tangamanga I-A	40	40	Activa
Club Deportivo Potosino	1.4	1.4	Activa
Tanque Tenorio	1,050	1,000	Activa
Deportivo Lomas	100	40	Activa
Villa Antigua	11	6	Activa
Valle de los Cedros	10	6	Activa
Villa Magna	16	2	Activa
Fracc. El Pedregal	20	20	Activa
IMMSA	40	40	Activa
Loma Prieta	0.8	0.3	Activa
<b>Total</b>	<b>1,889.2</b>	<b>1,575.7</b>	

Según el Estudio de Diagnóstico de INTERAPAS, se realizó un aforo en 5 sitios de descarga de aguas residuales. Se determinaron los aforos correspondientes a los sitios determinados (**Tabla 19**).

**Tabla 19.** Aforos realizados a los colectores de aguas residuales. Fuente: (Tecnología ASSUL, 2005)

<b>N°</b>	<b>Colector</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Aforos (l/s)</b>		
			<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Promedio</b>
<b>1</b>	Industrias I	Delegación Villa de Pozos; Intercepción entre la carretera SLP-Querétaro y el blvr. Las Mercedes, a 200 m de la carretera, al norte sobre el mismo blvr.	62.98	11.37	29.87
<b>2</b>	Industrias II	Delegación Villa de Pozos; Comunicación entre la calle Álvaro Obregón y el Fracc. Orquídea; camino de terracería.	34.97	5.12	13.32



<b>3</b>	Río España	Delegación Villa de Pozos; En los Cruces de Av. Seminario y Río España, a 20 m aguas abajo del puente de Av. Seminario.	671.7	298.2	4888.74
<b>4</b>	Enrique Estrada	En la parte sureste del distribuidor del cruce de la Carretera 57 y Anillo Periférico Norte, a la desembocadura de la calle Fernando Zamarripa, en Soledad de Graciano Sánchez.	57.75	12.36	36.59
<b>5</b>	Canal General	Cruce entre las calles Carlos V y Avenida Providencias, en las inmediaciones de la colonia Hogares populares Pavón y Central de Maquinaria, Soledad de Graciano Sánchez	560.6	111.2	281
<b>Total</b>			<b>1388</b>	<b>438.25</b>	<b>850.35</b>

Conforme a lo establecido en la **Tabla 19** los aforos suman un gasto promedio de 850.35 l/s, traducidos a 26,816,637 m<sup>3</sup>/año de aguas residuales en la ZMSLP. Los 14 sitios restantes de descarga INTERAPAS cuenta con un récord de aforos del año 2002 (**Tabla 20**).

**Tabla 20.** Aforos de los colectores de aguas residuales en la ZMSLP

<b>N°</b>	<b>Colector</b>	<b>Gasto (l/s)</b>
<b>1</b>	Pedroza	105
<b>2</b>	Sauzalito	61
<b>3</b>	Moctezuma	23
<b>4</b>	Guanos	56
<b>5</b>	San Felipe	19
<b>6</b>	San Juanico	20
<b>7</b>	Río Santiago	219
<b>8</b>	Valentín Amador	103
<b>9</b>	Canal Seis	79
<b>10</b>	Los Gomes Cactus	97
<b>11</b>	Camino a la Libertad	21
<b>12</b>	La libertad	194
<b>13</b>	Ranco Viejo-Cd 2000	216
<b>14</b>	Cancha Morelos	150
<b>Total</b>		<b>1,363</b>

El gasto promedio de agua residual generado en la ZMSLP resultante de la sumatoria de los 19 colectores es de 2,213 l/s, equivalentes a un volumen de 69,789,168 m<sup>3</sup>/año.

#### 4.2.2.6. Cobro por aprovechamiento de agua residual

Aún no han sido modificadas las concesiones otorgadas para el uso, aprovechamiento y tratamiento de agua residual cruda del drenaje municipal a los siguientes particulares: Fraccionamiento Villantigua, Club Campestre de Golf, Grupo Desarrollador CIMA, Agua Tratada del Potosí, IMMSA y Cementerio Valle de los Cedros, quienes reutilizan el agua tratada en diversas actividades (Interapas, 2018).

La reutilización de agua residual tratada se cuantifica a partir de la extracción por medidores de flujo instalados en el punto de extracción, que conforme a los convenios de concesión se determinan y calculan los montos específicos a pagar mensualmente en cada caso (Interapas, 2018). Los adeudos son notificados a la Dirección de Comercialización para la gestión del cobro, y que para el cierre del 2018 se generó un monto por aprovechamiento de 2,276,691.49 MXN por la extracción de un volumen de 2,336,506 m<sup>3</sup> (Tabla 21).

Tabla 21. Montos por aprovechamiento de agua residual (Interapas, 2018)

PTAR	Volumen Extraído (m <sup>3</sup> )	Ingreso Generado
Agua tratada del potosí	1,100,519.00	\$1,072,345.71
Club Campestre	237, 981.68	\$231,889.35
Valle de los Cedros	35,386.00	\$34,480.12
Fraccionamiento Villantigua	62,096.37	\$60,506.70
Grupo desarrollador CIMA	900,523.00	\$877,469.61
<b>Total</b>	<b>2,336,506.05</b>	<b>\$2,276,691.49</b>

### 4.3. Análisis Urbano de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí

Anteriormente se ha mostrado la importancia de confiar en herramientas de análisis, simulación y modelado hidrológico – hidráulico como proveedores de información básica para apoyar a los planificadores de la ciudad, los tomadores de decisiones y otras partes interesadas,

centrándose en la gestión del riesgo de inundaciones urbanas y su integración en la planificación y en la gobernanza urbana (Pappalardo et al., 2017). Particularmente, la simulación del comportamiento hidráulico e hidrológico de las cuencas frente a la precipitación se vuelve esencial para la identificación de las estrategias más eficientes para los SUDS

El primer análisis evalúa el proceso de crecimiento urbano en las últimas décadas examinando y comparando fuentes cartográficas históricas y actualizadas. Las áreas edificadas se han identificado en base a tres umbrales de tiempo representativos del crecimiento urbano, a saber, 1970, 1995 y 2000. Este análisis preliminar se realizó con la finalidad de obtener una indicación cualitativa sobre los procesos de crecimiento urbano y el progreso del sellado/cambio de uso de suelo.

#### 4.3.1. Crecimiento Urbano

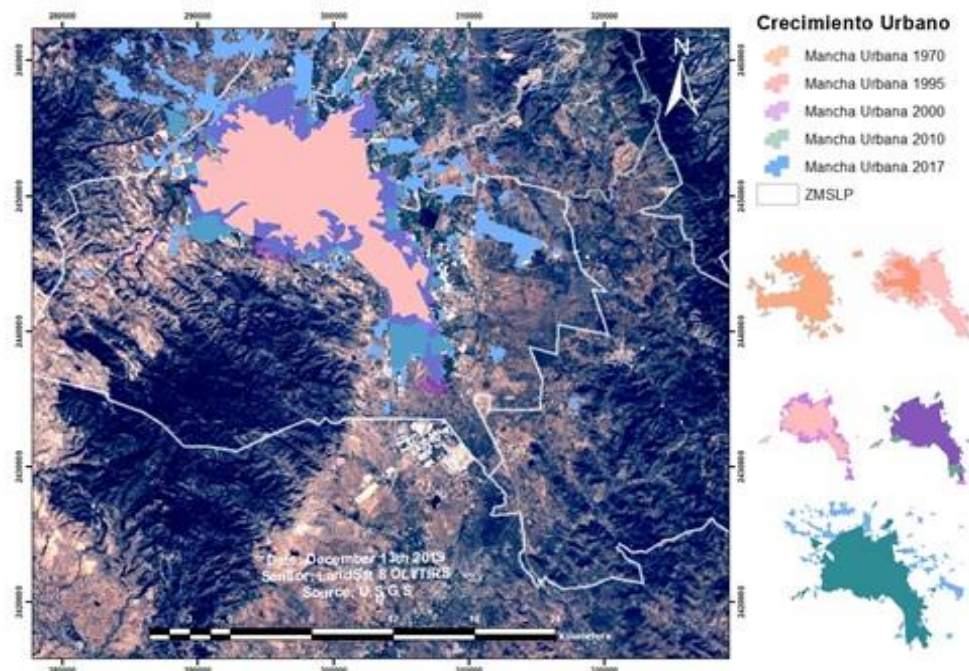
Es necesario contextualizar el crecimiento que ha tenido ZMSLP. En México se han generado tres grandes periodos de urbanización; el primer periodo corresponde a una “Urbanización incipiente” situada en los años de 1900 – 1940, el segundo denominado el “Crecimiento Rápido” que va de 1940 – 1980, el tercer y último, la “Consolidación Urbana” entre 1970 – 2010 (Matínez Torres, 2018). Las tendencias de urbanización en México están estrechamente vinculadas al desarrollo económico, a la concentración y distribución poblacional en las áreas urbanas (Garza & Schteingart, 2010).

En resumen, el crecimiento urbano en el periodo comprendido de 1940 – 2010 presenta ciertas características en el incremento poblacional que de contar con una población de 1.4 millones alcanzó los 79 millones principalmente en un periodo de 1940 – 1980 considerado como el periodo de crecimiento más acelerado. Sin embargo, el sistema de ciudades incrementó de 33 a 399, en las cuales solamente dos ciudades en 1900 disminuyeron su “índice de primacía” hasta constituirse con 304 ciudades en 1990 e ir teniendo un crecimiento paulatino a inicios del año 2000, con 367 en 2005 y un total de 399 ciudades en 2010 (Garza & Schteingart, 2010). Con esta peculiaridad el crecimiento urbano en México evoluciona constantemente en términos espaciales, económicos y poblacionales, estrechamente relacionados al contexto económico del país (Garza & Schteingart, 2010).

La ZMSLP tiene una tendencia similar con respecto al contexto nacional, principalmente en el periodo de “Crecimiento rápido” por formar parte de las primeras ciudades en el proceso de metropolización en México, y por pertenecer al conjunto de ciudades manufactureras de orden

medio que presentaron una mayor tendencia de crecimiento en México. Del mismo modo San Luis Potosí presenta los efectos de la apertura comercial al orientar su crecimiento hacia su área industrial hasta los años 2015 – 2017; cuyo periodo se encuentra dentro de la etapa de la “Consolidación urbana”

El crecimiento de la ZMSLP de 1970 a 2017 presenta con un patrón exponencial en una serie de mapas por la aparición de nuevos desarrollos urbanos cada vez más distantes, desconectados y poco más consolidados con respecto al área urbana, lo cual representa que la ZMSLP rebasa los municipios aledaños y por esto se utilizaron imágenes satelitales para observar el crecimiento a través de los años mencionados hasta la actualidad (**Figura 23**).



**Figura 23.** Crecimiento de la superficie urbana de la ZMSLP 1970-2017. Fuente: Elaboración propia

De forma que los resultados de la identificación del crecimiento superficial, densidad del área urbana y principalmente en el aumento del suelo urbano, son los aspectos que determinan el crecimiento urbano. Aunado a esto, el incremento poblacional también juega un papel fundamental en este crecimiento; donde es importante mencionar que tanto el crecimiento poblacional junto con la movilidad de población de áreas rurales a urbanas se encuentran entre los factores que determinan este crecimiento, a causa de la incorporación industrial en la ZMSLP (Matínez Torres, 2018).

En resumen, en lo que corresponde al proceso de crecimiento urbano para la ZMSLP, está en función de la velocidad con la que se incrementa el suelo urbano y de la densidad con la que se consume el suelo no urbanizado. También el crecimiento urbano es el resultado de la distribución de la población en la ZMSLP, su ocupación poblacional y al crecimiento industrial (Matínez Torres, 2018).

En lo referente a los factores superficiales sobre las tasas de crecimiento y las dimensiones del área urbana correspondiente a la ZMSLP, es debido al incremento que se tienen en el periodo que abarcan los años de 1995 al 2000 y la superficie urbana en 2010. Considerando el crecimiento hasta 2017, es observable que en tan solo un par de años las dimensiones urbanas crecieron ocho veces más rápido que en 15 años (1995-2010), mostrando un incremento aproximado de 16% en la superficie (Matínez Torres, 2018).

El crecimiento de la ZMSLP durante el periodo de 1995-2010 se considera bueno, al no sobrepasar el 2% del crecimiento anual y tener un incremento del 0.11% durante los años de 1995-2000 e ir en decremento hasta el 2015; sin embargo, en los últimos años el crecimiento anual estuvo casi tres veces mayor a la de población 6.5% y 2.7% respectivamente; representando el 13.7% de la superficie urbana de la ZMSLP y mantiene dentro de ella importantes planicies agrícolas y elevaciones de valor ambiental y cultural. Cuenta con una densidad poblacional, urbana y habitacional por debajo de lo registrado en la aglomeración urbana: 563 de 778 hab/km<sup>2</sup>, 3,913 de 4314 hab/km<sup>2</sup> y 1,009 de 1,094 viv/km<sup>2</sup>, respectivamente (ONU-Habitat, 2016).

Las tasas extensivas de crecimiento de la ZMSLP, cuya superficie ha incrementado 3.3 veces más que la población, y en conjunto al desarrollo industrial en su zona conurbada, han causado una extracción intensiva de agua, por lo que la disponibilidad de los recursos hídricos (Ver apartado 4.2.2.4) es una de las principales condiciones del desarrollo urbano, económico y agropecuario del área urbana de la ZMSLP (ONU-Habitat, 2016). De la misma manera el crecimiento urbano de forma dispersa e insostenible ha causado un consumo excesivo de suelo y biodiversidad al imponerse a los cambios de uso de suelo urbano a los usos ambientales o agropecuarios preexistentes (ONU-Habitat, 2016).

#### 4.3.2. Sectorización de la ZMSLP

La delimitación de los sectores se realizó con base al área definida para la urbanización de la ZMSLP. Se consideró el territorio delimitado por el anillo periférico que la encierra en su totalidad comprende al noreste la conurbación de Soledad de Graciano Sánchez, al sureste la zona industrial y la Delegación Villa de Pozos, al sur de la ciudad la Sierra de San Miguelito, Delegación La Pila y la localidad de Escalerillas, la cual se extiende cada vez hacia la traza urbana de la Zona Metropolitana.

Considerando la relevancia del área urbana, se utilizó la información disponible de las AGEBS urbanas (Área Geoestadística Básica), las cuales cuentan con información para la estimación del crecimiento poblacional y la delimitación de los sectores con mayor densidad habitacional.

Se delimitaron tres cuencas en la ZMSLP para el análisis de la incorporación de los SUDS. En La **Figura 24** se representan las cuencas establecidas para cada uno de los tres subsectores delimitados (véanse las **Figura 25**, **Figura 26** y **Figura 27**).

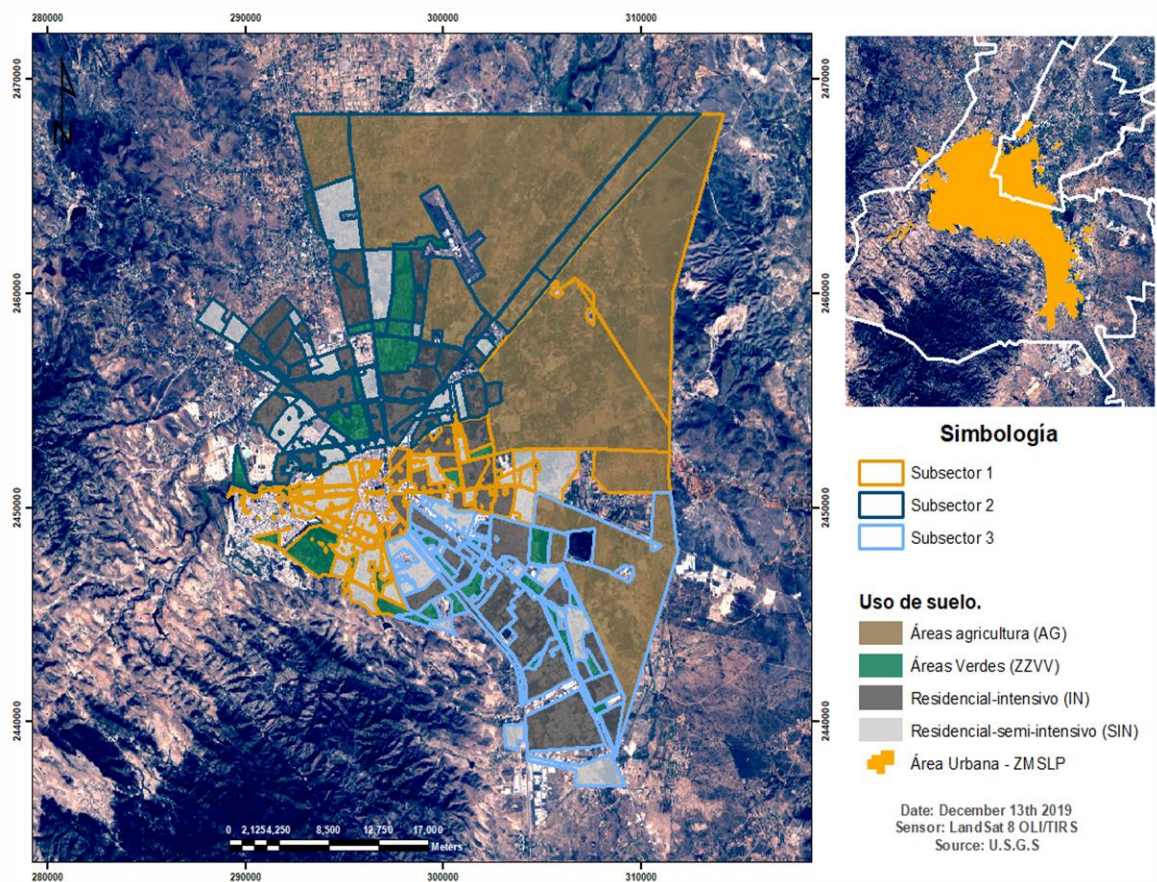


Figura 24. Sectorización de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

En función del análisis se establecieron cuatro categorías de uso de suelo dentro de cada cuenca: Residencial-intensivo (áreas que presentan un grado de permeabilidad superior al 50%), residencial semi – intensivo (áreas que presentan un grado de permeabilidad inferior al 50%), áreas verdes dentro de la ciudad y áreas destinadas a la agricultura o de suelo desnudo (Tabla 22).

Tabla 22. Categorías de uso de suelo para cada subsector (cuenca) de la ZMSLP (10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>)

Captación	Urbano Intensivo (IN)	Urbano Semi-intensivo (SIN)	Áreas verdes / Deportivas (ZZVV)	Agricultura/ Cultivos (AG)	Total
SZ1	1406.67	1347.23	690.35	9557.09	13,001.35
SZ2	1231.87	3015.90	1465.49	11,334.31	17,047.58
SZ3	856.29	1305.14	1089.60	3929.98	7181.00

Subsector 1 – Centro de San Luis Potosí, Lomas Tangamanga (SLP) y Soledad Sur (SGS) (Figura 25).

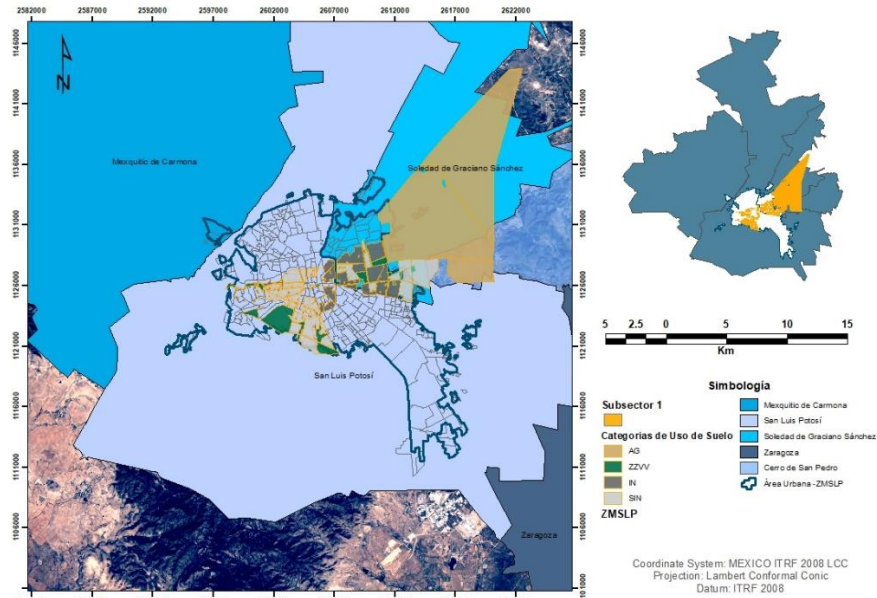


Figura 25. Sectorización - Subsector 1.

Tabla 23. Usos de Suelo (10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>) para la cuenca del Subsector 1.

<b>SZ1</b>				
<b>130,013,479.45</b>				
Urbano Intensivo (IN)	Urbano Semi – intensivo (SIN)	Áreas verdes / Deportivas (ZZVV)	Agricultura/ Cultivos (AG)	
13,472,345.09	14,066,651.93	6,903,542.66	95,570,939.77	

11 %	10 %	5 %	74 %
------	------	-----	------

Tabla 24. Número total de viviendas y población total en el Subsector 1.

SZ1	
Viviendas Totales	Población Total
108,374.00	320,422.00

Subsector 2 – Morales – Industrial Aviación (SLP), Saucito – Terceras (SLP), Soledad Norte (SGS) (Figura 26).

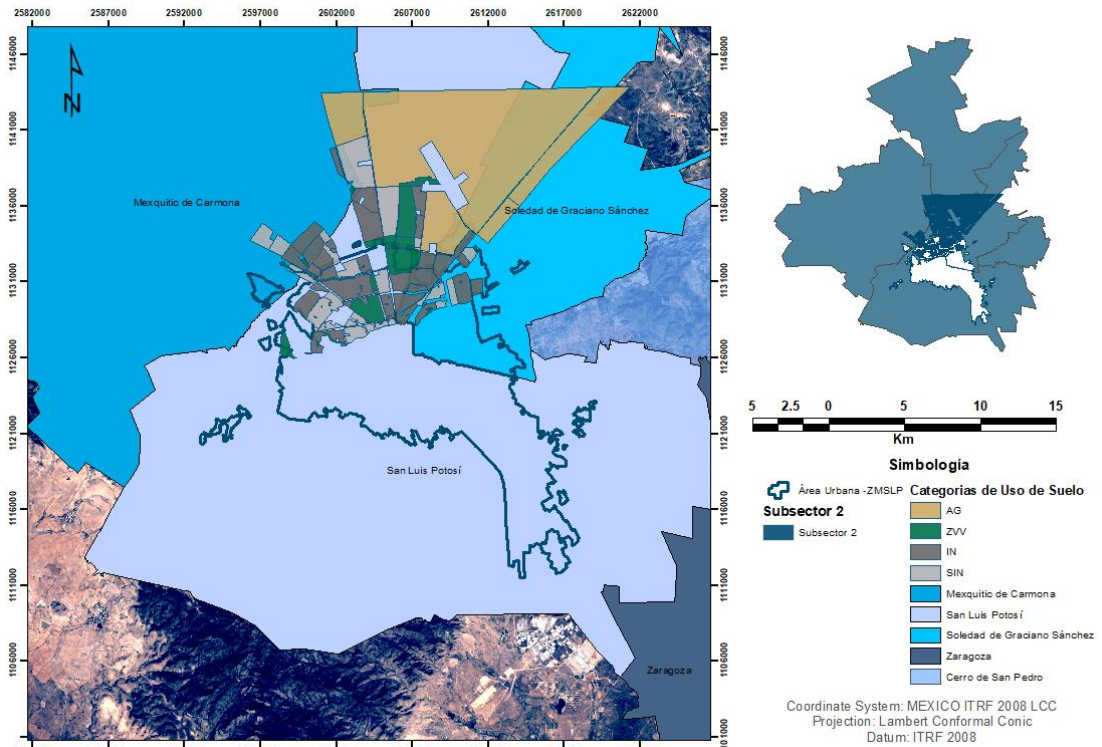


Figura 26. Sectorización - Subsector 2.

Tabla 25. Usos de Suelo (10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>) para la cuenca del Sector 2.

SZ2			
170,475,776.89			
Urbano Intensivo (IN)	Urbano Semi – intensivo (SIN)	Áreas verdes / Deportivas (ZVV)	Agricultura/ Cultivos (AG)
12,318,741.43	30,159,042.58	14,654,925.49	113,343,067.39
0.07	0.18	0.09	0.66



Tabla 26. Número total de viviendas y población total en el sector 2.

SZ2	
Viviendas Totales	Población Total
123,020.00	358,981.00

Subsector 3 – Satélite – Progreso (SLP), Zona industrial, Delegación de Pozos.

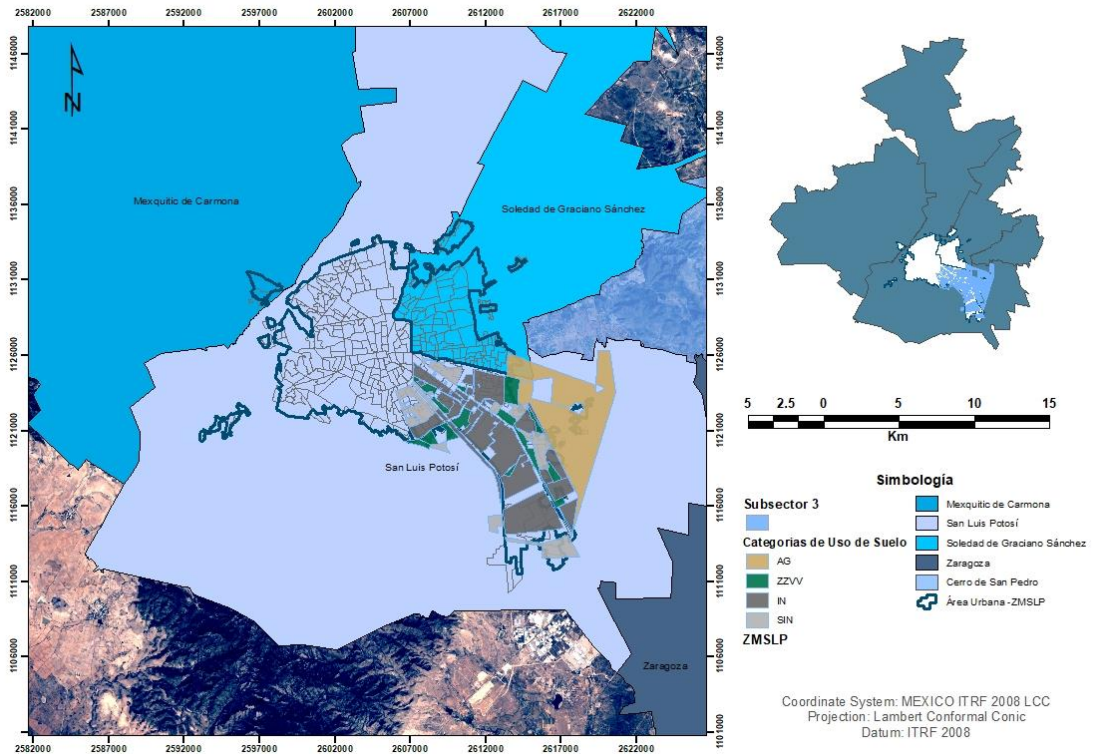


Figura 27. Sectorización - Subsector 3.

Tabla 27. Usos de Suelo ( $10^4 \text{ m}^2$ ) para la cuenca del Subsector 3

SZ3			
71,810,039.65			
Urbano Intensivo (IN)	Urbano Semi – intensivo (SIN)	Áreas verdes / Deportivas (ZZVV)	Agricultura/ Cultivos (AG)
8,562,858.84	13,051,439.40	10,895,981.80	39,299,759.61
0.12	0.18	0.15	0.55

Tabla 28. Número total de viviendas y población total en el Subsector 3.

SZ3	
Viviendas Totales	Población Total
69,737.00	225,729.00

En la sectorización se tomó en cuenta la red de alcantarillado en el área urbana de la ZMSLP para el establecimiento de los subsectores. La red cuenta con un sistema combinado de drenaje, desaloja aguas residuales y aguas pluviales usando el mismo sistema de tuberías, el cual desaloja el agua residual del área urbana a través de colectores que la cruzan de suroeste a noreste. Actualmente la ciudad cuenta con 19 sitios principales de vertido de aguas residuales a los cuerpos receptores y para facilitar su operación, la infraestructura de drenaje y alcantarillado se divide en tres cuencas sanitarias (**Figura 28**):

- I. Cuenca sanitaria “Norte”, con una superficie de 45.37 km<sup>2</sup> y al año 2003 urbanizada al 59.5%
- II. Cuenca sanitaria “El Morro”, con una superficie de 45.37 Km<sup>2</sup> y urbanizada al 55.63 %
- III. Cuenca sanitaria “Tanque Tenorio” con una superficie de 96.27 km<sup>2</sup> y urbanizada al 74.54%

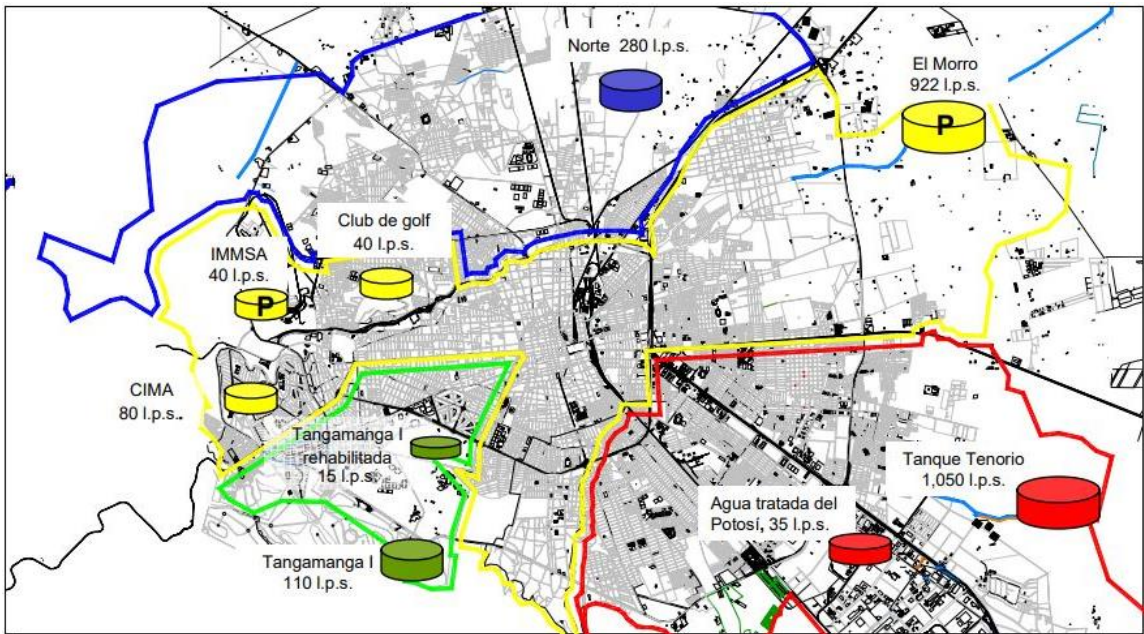


Figura 28. Cuencas sanitarias dentro del área urbana de la ZMSLP (Fuente: INTERAPAS)

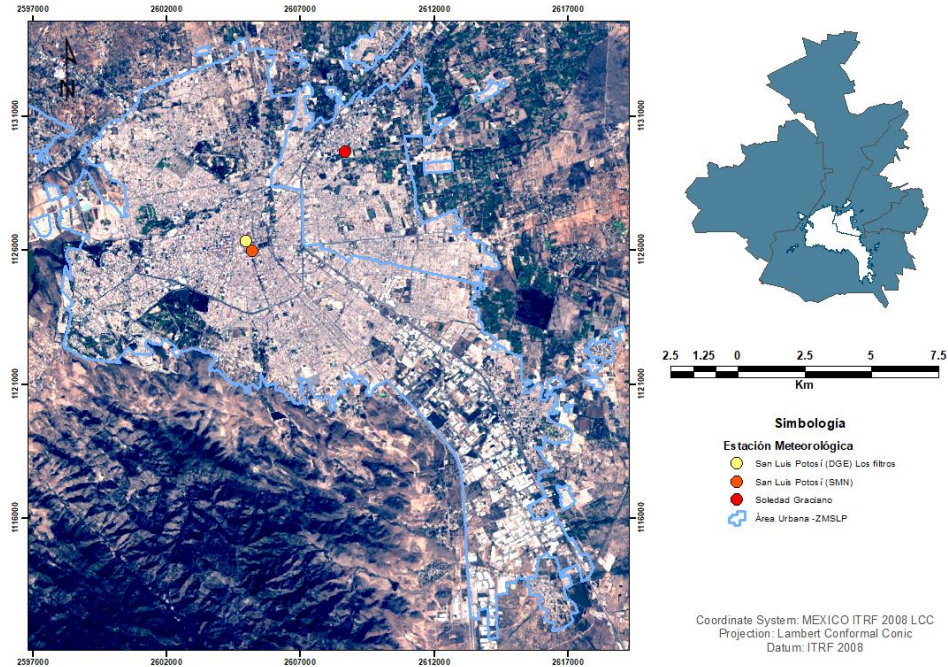
El uso de suelo se derivó de mapas a escala 1:250,000 proporcionados por la cartografía nacional mexicana, usada para la identificación del crecimiento de las zonas metropolitanas del país.

#### 4.4. Análisis Hidrológico

El análisis de precipitación se hizo bajo los valores de la información histórica disponible en las estaciones meteorológicas que abarcan o circulan el área urbana de la ZMSLP provistas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y por la CONAGUA y que normalmente son la base de los modelos de drenaje urbano convencionales (**Figura 29**). Para cuestiones del estudio se seleccionaron las estaciones que se muestran en la **Tabla 29**.

**Tabla 29.** Estaciones Meteorológicas seleccionadas de la ZMSLP

Clave	Nombre de la Estación	Ubicación	Precipitación Promedio (mm/año)	Precipitación Promedio Diaria (mm/día)	Temperatura Máxima Promedio diaria (°C)	Temperatura Mínima Promedio diaria (°C)
24111	San Luis Potosí (SMN)	San Luis Potosí	382.6	1.0	26.16	14.2
24069	San Luis Potosí (DGE) los filtros	San Luis Potosí	398.5	1.1	24.4	10.6
24081	Soledad de Graciano Sánchez	Soledad de Graciano Sánchez	344.4	0.93	25.9	9.7



**Figura 29.** Localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de estimar los volúmenes óptimos de aguas pluviales a gestionar localmente mediante SUDS se extrajeron los valores de precipitación promedio, temperatura máxima y mínima, y valores de evaporación de las estaciones meteorológicas, valores que abarcan aproximadamente los años de 1945 – 2015. Se calculó el valor de la evapotranspiración potencial (ETP) a través del método de Hargreaves.

Las curvas I-D-Tr se derivaron de los valores de precipitación obtenidos en los periodos de 1945 – 2015, y teniendo en cuenta los valores máximos anuales de las profundidades de precipitación registradas a 1.1 h para 5, 10, 15, y 100 años.

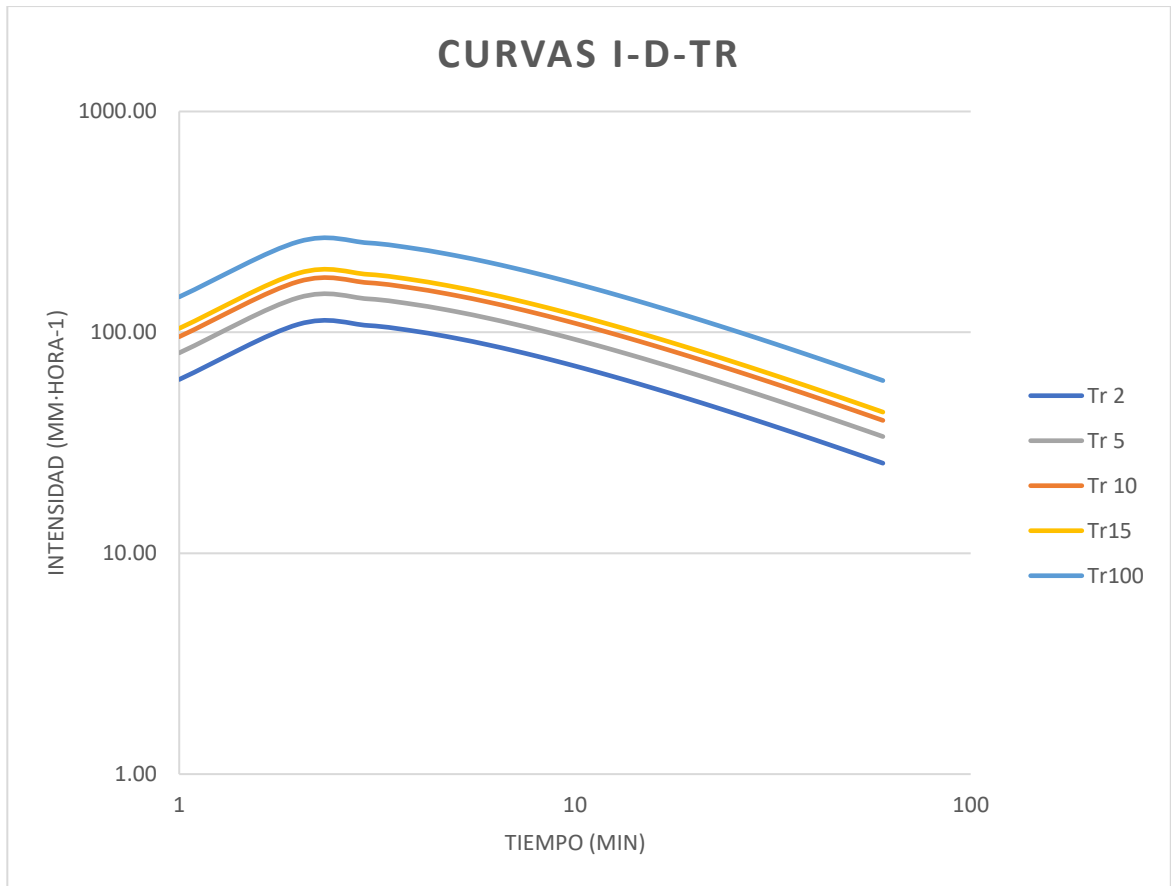


Figura 30. Curvas I-D-Tr de los valores de precipitación analizados

#### 4.5. Balance Hídrico Volumétrico General

La ecuación de estado para un sistema hidrológico lineal (eq. 1) relaciona entradas ( $IP$ ), salidas ( $O$ ) y una variación interna del sistema ( $S$ ) como funciones del tiempo:

$$\frac{dS}{dt} = IP(t) - O(t), \quad (1)$$

Para el ciclo hidrológico urbano propuesto el contenido de agua ( $\theta$ ) varía como resultado de la evapotranspiración ( $ETk$ ), el riego ( $I$ ), la precipitación ( $P$ ), la recarga del acuífero ( $D$ ) y la escorrentía ( $R$ ). Se usa una escala temporal diaria quedando discretizado como sigue (eq. 2):

$$\frac{d\theta}{dt} = P(t) + I(t) - ETk(t) - D(t) - R(t), \quad (2)$$

La precipitación y evapotranspiración se obtienen de las estaciones meteorológicas, ( $R$ ) se estima con modelo del número de curva ( $CN$ ) del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS) para cada uso del suelo de la cuenca y se han definido cuatro usos en cada cuenca (residencial intensivo, residencial semi-intensivo, áreas verdes áreas de agricultura (**Tabla 30**)).

**Tabla 30.** Número de Curva ( $CN$ ) para cada uno de los usos de suelo definidos; pavimentos permeables y cubiertas verdes

$CN_{in}$	$CN_{sin}$	$CN_{zzvv}$	$CN_{ag}$	$CN_{pp}$	$CN_{gr}$
98	92	90	85	85	85

Adicionalmente se incorporan en el modelo tres categorías de SUDS las cuales son comprendidas en la mayoría de las instalaciones de SUDS para la gestión sostenible de agua de escorrentía:

I. SUDS destinados al control local.

Una fracción de la escorrentía superficial de cada uso de suelo se colecta y almacena para la reutilización en el riego de áreas verdes de cada una de las subcuencas establecidas. Definidos por la tasa de escorrentía ( $k_i$ ) detenida en cada uso de suelo ( $i$ ), mientras que la porción restante de ( $R$ ) va dirigida al sistema urbano de drenaje convencional ( $CUD$ ) (eq. 3).

$$R(t) = \sum k_i R_i(t) + CUD(t), \quad (3)$$

II. SUDS destinados a la infiltración directa de la precipitación.

Las propiedades de infiltración de cada uso de suelo se incorporan al modelo a través de pavimentos permeables. Para esto, se definen tasas de infiltración  $k_{pp_i}$  que representan la porción total del área que es ocupada por los SUDS para cada uso de suelo ( $i$ ), y se asignaron valores específicos de infiltración a cada porción.

III. Cubiertas verdes.

La incorporación de cubiertas vegetales al modelo es a través áreas verdes; la escorrentía se dirige directamente a  $CUD$ , la infiltración se almacena en el suelo hasta el nivel de saturación, y al ser alcanzada el resto de la infiltración se descarga al  $CUD$ , las plantas consumen el contenido de humedad del suelo a una tasa de  $ETk$  y el déficit es cubierto por  $I$ . La porción del área total cubierta por los SUDS para cada uso de suelo es definida por  $k_{gr_i}$ .

El balance hídrico volumétrico se calculó para cada una de las combinaciones posibles de SUDS implementados por  $k_i, kgr_i, kpp_i$ , diariamente, con valores diarios de  $P$  y  $ETk$  (se consideró un coeficiente de cultivo  $kkc = 1$  para transformar  $ET0$  en  $ETk$ ) y se supone un valor de  $\theta_0 = 0.2$ . Además se estimó el agregado anual de  $D, I, CUD$  y se calculó una función de costo para cada combinación de SUDS. Se seleccionaron los conjuntos de SUDS que lograron minimizar el coste agregado ( $CT$ ) y aquellos que cumplieron con las restricciones planteadas.

$$CT = VSUD_{MAX} \times CUVSUD + \sum CUSUD_i \times k_i \times R_i + CUCUD \times CUD + CUI \times I \\ + CU_{pp} \times \sum kpp_i \times S_i + CU_{gr} \times \sum kgr_i \times S_i$$

St:

$$D \geq D_{min}$$

$$CUD_{min} \leq CUD \leq CUD_{max}$$

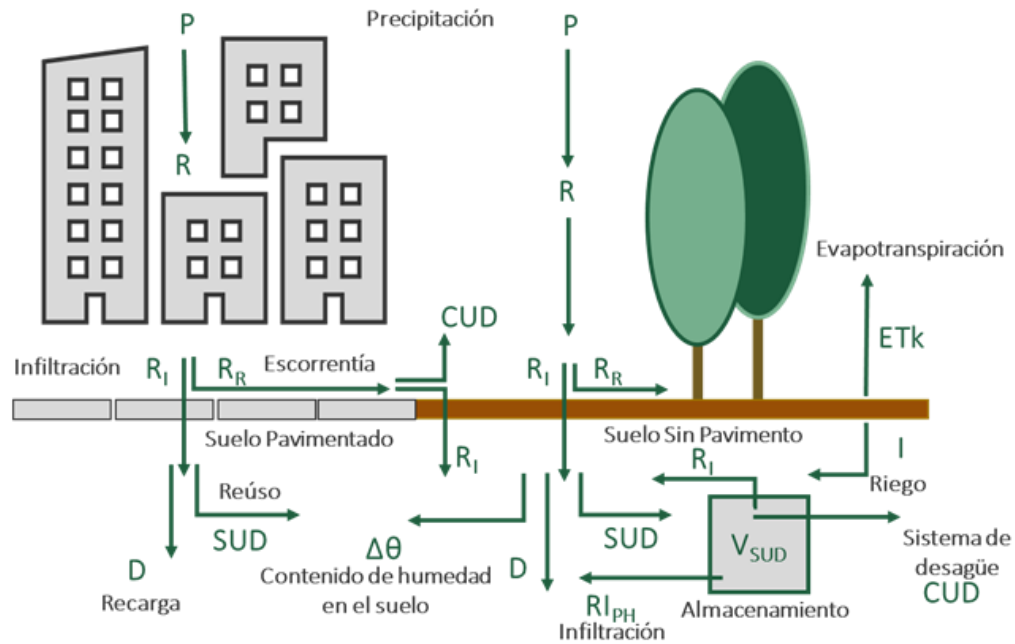
Donde:

- $VSUD_{MAX}$ : Capacidad de almacenamiento provista
- $CUVSUD$ : Costo unitario de los elementos de almacenamiento en €/m<sup>3</sup>
- $CUSUD_i$ : Costo unitario de la detención, almacenamiento y la reutilización de la escorrentía para cada uso de suelo en €/m<sup>3</sup>
- $CUCUD$ : Costo unitario del manejo de escorrentía a través de las instalaciones de drenaje convencionales en €/m<sup>3</sup>
- $CUI$ : Costo unitario de riego en €/m<sup>3</sup>
- $CU_{pp}$ : Costo unitario de pavimentos permeables en €/m<sup>2</sup>
- $CU_{gr}$ : Costo unitario de cubiertas verdes en €/m<sup>2</sup>.
- $\sum kpp_i \times S_i$  y  $\sum kgr_i \times S_i$ : Las áreas ocupadas por pavimentos permeables y/o cubiertas verdes.

A los criterios económicos se agregaron dos objetivos hidrológicos:

- $D \geq D_{min}$ : El acuífero que se va a recargar por encima de un límite dado buscando cumplir con los objetivos ambientales o compensar las extracciones de agua.
- $CUD_{min} \leq CUD \leq CUD_{max}$ : Se supone que  $CUD$  finalmente se dirige a los cursos de agua, esta restricción busca mantener los caudales ecológicos sin exceder un límite superior para evitar el riesgo de inundación.

Las incógnitas del problema con fines de optimizar fueron  $VSUD_{MAX}$  y las tasas de  $kpp_i, kgr_i$  y  $k_i$ . El balance hídrico volumétrico general es aplicado sobre cada una de las tres subcuencas (subsectores) definidas en la ZMSLP su esquematización se representa en la **Figura 31**.



**Figura 31.** Esquematización del Balance hídrico volumétrico general (Adaptado de: (Zubelzu et al., 2019)).

El esquema muestra las direcciones que toma el balance propuesto; en donde el volumen de agua que es administrado al sistema está referido al volumen genérico que es susceptible a ser captado, almacenado y reutilizado en el sitio. Es como tal, el resultado de la implementación de uno o de varios SUDS. Los criterios establecidos pueden ser definidos a través de cada variable del balance:

Para cada uso de suelo dentro de las subcuencas (subsectores) donde la precipitación ( $P$ ) se divide en escorrentía ( $R$ ) e infiltración/riego ( $I$ ) de la siguiente manera:

$$R_{Ri} = \sum R_i \times CN_i$$

$$R_{I=} = \sum R_i \times (1 - CN_i)$$



La porción de escorrentía que se infiltra en el pavimento ( $k_i R_i$ ) puede ser gestionada localmente a través de SUDS o puede percolarse hasta el nivel freático ( $D$ ), dependiendo de que si el agua infiltrada se está captando o no.

La escorrentía que se infiltra en áreas de agricultura ( $kgr_i R_i$ ) aumentan el contenido de agua del suelo ( $\theta$ ) para alcanzar la saturación. Una vez que el suelo está saturado, la lluvia infiltrada adicional se maneja a través de SUDS o se percola hasta el nivel freático ( $D$ ).

Se consideran dos alternativas para la escorrentía: 1) La escorrentía de las áreas permeables e impermeables se trasmite directamente al sistema urbano de drenaje convencional ( $CUD$ ) o 2) La escorrentía de las áreas impermeables se transporta a las áreas permeables para infiltrarse en conjunto con la escorrentía generada en áreas permeables.

La evapotranspiración de los cultivos ( $ETk$ ) depende de la evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ) y la tasa de infiltración del cultivo ( $kkc$ )

$$Etk = kkc \times ET_0$$

La variación del contenido de humedad del suelo ( $\Delta\theta$ ) solo está referido a las áreas de agricultura. El contenido de agua en el suelo varía según la infiltración de escorrentía. Se puede calcular de la siguiente manera donde la variación del contenido de agua en un tiempo dado es ( $\theta_i - \theta_{i-1}$ ):

$$\Delta\theta = (\theta_i - \theta_{i-1}) + I - ET_0 \times kkc$$

El volumen de almacenamiento  $VSUD_{MAX}$  es una variable de diseño (optimización del modelo) siendo:

$$VSUD(t) = VSUD_{t-1} + k_i \times (R_i)_{t-1} + kgr_i \times (R_{gr})_{t-1} + kpp_i \times (R_{pp})_{t-1} \\ \leq VSUD_{MAX}$$

El exceso de escorrentía recolectada, así como la fracción no captada en cada uso del suelo ( $i$ ), se dirigen al sistema urbano de drenaje convencional ( $CUD$ ) para su depuración según:

$$CUD = R_i \times (1 - k_i) + R_{gr} \times (1 - kgr_i) + R_{pp} \times (1 - kgr_i) + [VSUD_{t-1} \\ + \sum k_i R_i - VSUD_{MAX}]$$

#### 4.6. Resultados

Se establecieron una serie de valores para cada uno de los costos asociados a la gestión de agua **Tabla 31**. Los valores de *CUCUD*, *CUI*, y *CUVSUD* se establecieron de acuerdo a (Zubelzu et al., 2019), los valores establecidos para *CUSUD<sub>in</sub>*, *CUSUD<sub>sin</sub>*, *CUSUD<sub>zzvv</sub>* y *CUSUD<sub>ag</sub>*, *CUpp* y *CUgr* se definieron con ayuda de agentes locales de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España. Los costos utilizados en esta investigación específicamente los usados para pavimentos permeables y cubiertas verdes, están relacionados a otros estudios, por ejemplo en (Bai et al., 2019).

**Tabla 31.** Costos unitarios para la optimización del modelo

<b>Costos Unitarios</b>	<b>Valor (€/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Valor (\$/m<sup>3</sup>)</b>
<i>CUCUD</i>	1.99	49.4
<i>CUI</i>	1.68	41.7
<i>CUVSUD</i>	0.315	7.8
<i>CUSUD<sub>in</sub></i>	0.1	2.5
<i>CUSUD<sub>sin</sub></i>	0.1	2.5
<i>CUSUD<sub>zzvv</sub></i>	0.8	19.8
<i>CUSUD<sub>ag</sub></i>	0.9	22.3
<i>CUpp</i> (m <sup>2</sup> )	25	620.3
<i>CUgr</i> (m <sup>2</sup> )	25	620.3

Los costos presentados en la **Tabla 31**. varían y se actualizan conforme a hipoteca establecida al inicio de los proyectos de implementación de los diferentes tipos de SUDS y abarcan tanto los costos de instalación o construcción como los de operación y mantenimiento. A partir de estos costos unitarios es posible calcular los costos anuales totales de la gestión de agua en cada subsector al implementar SUDS.

En México específicamente una investigación de la Universidad Veracruzana estima el valor aproximado que tendrían las cubiertas verdes y su costo ronda de 299.13 – 3,500 \$/m<sup>2</sup> dependiendo del tipo de sistema implementado y de los valores del mercado para los diversos elementos que componen al sistema (Limón Bandola, 2011). Por parte de los pavimentos permeables de acuerdo a (saucedo Vidal, 2010), se estima un costo que ronda los valores de 151.71 – 268.26 \$/m<sup>2</sup> donde la diferencia en el costo total depende de los materiales utilizados, la mano de obra y los mantenimientos requeridos al sistema.

Utilizando la distribución actual de los usos de suelo (véase sección 4.3.2) y/o suponiendo la situación original del suelo (predesarrollo), en la que la superficie está completamente ocupada por

usos agrícolas; donde se representaría una medida hipotética en la que podrían estimarse las tasas de recarga potenciales de los acuíferos ( $D$ ) y de alimentación a los cauces ( $CUD$ ). En las **Tabla 32** y **Tabla 33** se presentan los resultados de la ejecución del modelo.

**Tabla 32.** Principales variables de balance de agua para el estado actual.

Captación	$D$ (m <sup>3</sup> /año)	$CUD$ (m <sup>3</sup> / año)	$I$ (m <sup>3</sup> / año)	$CT$ (€/año)
SZ1	50,497,634.69	3,741,781.23	1,965,519.25	11,409,716.99
SZ2	64,526,169.28	4,607,891.62	4,172,428.50	16,840,884.21
SZ3	25,238,222.93	2,209,662.10	3,102,213.31	10,270,445.96

**Tabla 33.** Principales variables de equilibrio hídrico para el estado de predesarrollo.

Captación	$D$ (m <sup>3</sup> /año)	Escorrentía superficial a cursos de agua (m <sup>3</sup> /año)
SZ1	54,328,896.67	2,356,980.36
SZ2	71,236,927.95	3,090,510.77
SZ3	30,007,351.85	1,301,825.42

Para encontrar la combinación óptima de SUDS, la función de coste se definió de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}
 CT_{\text{mín.}} = & CUD \times CUCUD + I - CUI + VSUD_{MAX} \times CUSUD + k_{in} \times R_{in} \times CUSUD_{in} \\
 & + k_{sin} \times R_{sin} \times CUSUD_{sin} + k_{zzvv} \times R_{zzvv} \times CUSUD_{zzvv} + k_{ag} \times R_{ag} \times CUSUD_{ag} \\
 & + (kpp_{in} \times S_{in} + kpp_{sin} \times S_{sin} + kpp_{zzvv} \times S_{zzvv}) CU_{pp} \\
 & + (kgr_{in} \times S_{in} + kgr_{sin} \times S_{sin}) \times CU_{gr}
 \end{aligned}$$

St:

$$0 \leq k_{in}, k_{sin}, k_{zzvv}, k_{ag} \leq 1$$

$$0 \leq kpp_{in}, kpp_{sin}, kgr_{in}, kpp_{zzvv}, kgr_{sin} \leq 0,3$$

$$100,000 \leq VSUD_{MAX} \leq 4,600,000$$

Las áreas potenciales aptas para pavimentos permeables y cubiertas verdes no alcanzan el área total de cada uso de suelo ( $kpp, kgr \leq 0,3$ ), ya que tales instalaciones solo pueden instalarse en ciertas zonas (cubiertas verdes en edificios y pavimentos permeables fuera de edificios y áreas sin pavimentar). Además, se asumió que sólo en áreas urbanas con uso de suelo residencial intensivo ( $in$ ) y semi-intensivo ( $sin$ ) se pueden instalar cubiertas verdes mientras que en uso residencial semi-intensivo ( $sin$ ) y áreas verdes ( $zzvv$ ) sólo se pueden implementar pavimentos permeables. De manera contraria, se dejó que las tasas de infiltración  $k_{in}, k_{sin}, k_{zzvv}$  y  $k_{ag}$  variarían entre 0 y 1, ya que se asumió que la tasa de retención de escorrentía puede variar perfectamente entre los valores

0 y 1. Para el caso de  $VSUD_{MAX}$  se limitó a la escorrentía máxima que aparece si se presentan los valores de precipitación máxima de acuerdo con la serie de datos históricos.

Se consideró la recarga o reabastecimiento de las extracciones de agua para el establecimiento de límites a  $D$ . Para cada subsector, se estableció que el valor de  $D$  fuera mayor que la tasa proporcional (según el área de cada cuenca sobre el área total de la ZMSLP) de las extracciones anuales del acuífero estimadas en  $1.25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  (**Tabla 15**).

La cantidad de escorrentía que se dirige a  $CUD$  para alimentar los cursos de agua se estableció para ser menor que los valores previos al desarrollo (**Tabla 33**) y mayor que los que supuestamente se encuentran actualmente (**Tabla 32**) para garantizar que la implementación de SUDS mantenga los posibles flujos/caudales ecológicos sin aumentar el riesgo actual de inundación. La **Tabla 34** resume los límites establecidos para  $D$  y  $CUD$ .

**Tabla 34.** Resumen de límites para  $D$  y  $CUD$  ( $\text{m}^3$ ).

Variable	SZ1	SZ2	SZ3
$D$	$\geq 42,704,000$	$\geq 56,520,000$	$\geq 23,864,000$
$CUD$	$\geq 2,356,980.36,$ $\geq 3,741,781.23$	$\geq 3,090,510.77,$ $\geq 4,607,891.62$	$\geq 1,301,825.42,$ $\geq 2,209,662.10$

El problema multi-objetivo se resolvió para encontrar la combinación de  $kin$ ,  $ksin$ ,  $kzzvv$ ,  $kag$ ,  $kppin$ , y  $VSUD_{MAX}$  cumpliendo con las restricciones propuestas y maximizando la función de costo. Se comprobaron todas las combinaciones posibles de estas variables calculando el balance hídrico y la  $CT$  y se obtuvieron los valores óptimos

Se comprobaron todas las combinaciones posibles de estas variables calculando el balance hídrico y la  $TC$  y se obtuvieron los valores óptimos (**Tabla 35**).

**Tabla 35.** Combinación óptima de SUDS por subsectores.

SUD	SZ1	SZ2	SZ3
$kppin$	0.0	0.0	0.0
$kppsin$	0.0	0.0	0.0
$kppzzvv$	0.0	0.0	0.0
$kgrin$	0.0	0.0	0.0
$kgrin$	0.0	0.0	0.0
$VSUD_{MAX}(\text{m}^3)$	1,100,000	1,100,000	1,100,000
$kzzvv$	0.1	0.0	0.2
$kag$	0.0	0.0	0.0
$kin$	0.9	1	0.9

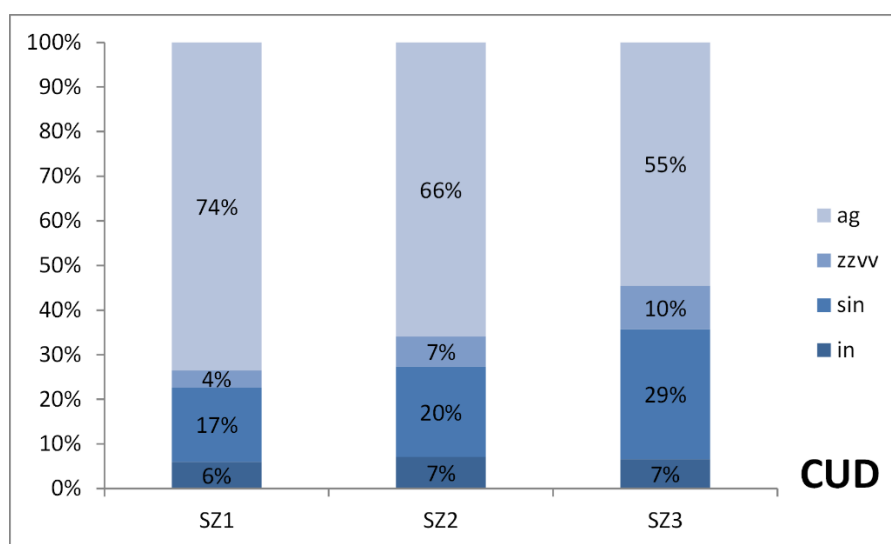
SUD	SZ1	SZ2	SZ3
$k_{sin}$	0.2	0.4	0.2
CT (€)	6,616,706	11,805,947	7,055,552

De la **Tabla 35**, se puede observar que las cubiertas verdes y los pavimentos permeables se ven penalizados por su costo elevado en comparación con los costos de las instalaciones destinadas a la captación y reutilización del agua de escorrentía. La **Tabla 36**, presenta las principales variables del balance hídrico para las combinaciones óptimas de SUDS.

**Tabla 36.** Principales variables de balance hídrico para una combinación óptima de SUDS.

Captación	$D$ (m <sup>3</sup> /año)	$CUD$ (m <sup>3</sup> /año)	$I$ (m <sup>3</sup> /año)
SZ1	50,497,634.69	2,357,176.78	853,518.62
SZ2	64,526,169.28	3,115,913.90	3,030,168.29
SZ3	25,238,222.93	1,305,844.86	2,379,628.70

Como era de esperar que las combinaciones óptimas de SUDS logran reducir los valores de  $CUD$  hasta que alcanzan prácticamente el estado de predesarrollo (**Figura 32**), mientras que  $D$  supera ampliamente los umbrales mínimos establecidos (**Figura 33**). Los valores de  $D$  y  $CUD$  provienen principalmente de áreas destinadas a la agricultura, mientras que la escorrentía almacenada en  $VSUD$  se es retenida casi en su totalidad en los usos residencial intensivo y semi-intensivo del área urbana (**Figura 34**).



**Figura 32.** Contribución de los usos del suelo a CUD.

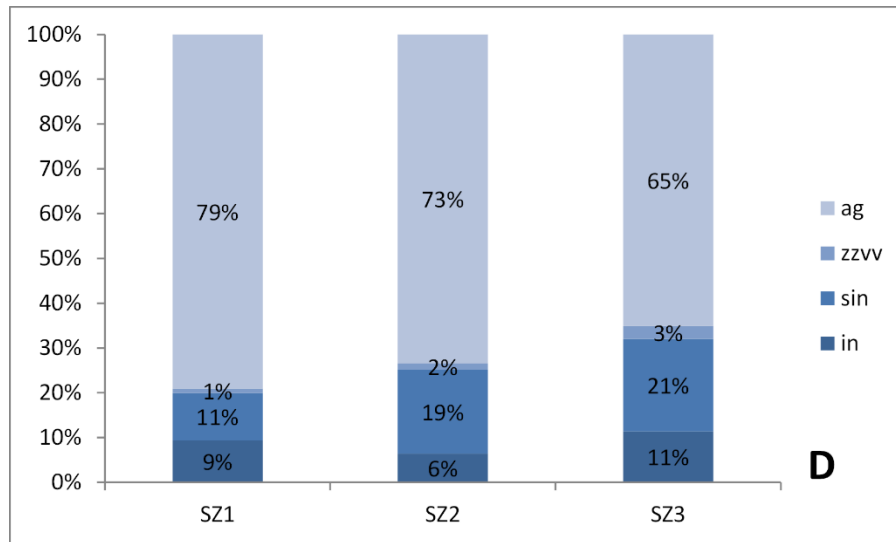


Figura 33. Contribución de los usos del suelo a D

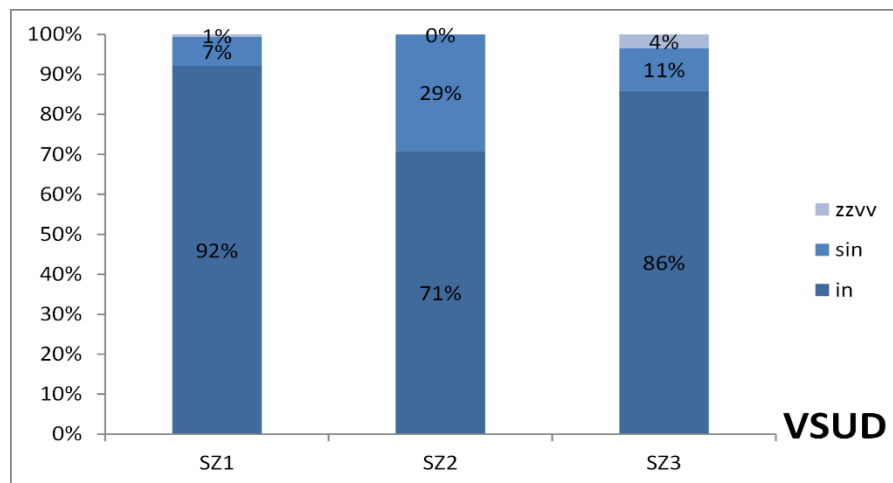


Figura 34. Volumen de agua almacenada (VSUD)

Dado a que la mayoría de las ciudades crecen a expensas de las áreas rurales o destinadas a agricultura como se observó en lo relacionado al área urbana de la ZMSLP (Figura 23), se estudiaron diferentes escenarios para cada subsector (Tabla 37), ya sea desarrollando zonas residenciales intensivas en áreas de agricultura (manteniendo constantes las áreas urbanas de uso residencial semi-intensivo y áreas verdes) o desarrollando áreas urbanas de uso residencial semi-intensivo (manteniendo constantes las áreas urbanas de uso residencial intensivo y áreas verdes).

**Tabla 37.** Escenarios para analizar la sensibilidad de la combinación óptima de SUD a los desarrollos urbanos ( $10^6 \text{ m}^2$ ).

Captación/ Uso de suelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>SZ1</b>	<b>Intensivo</b>	14.07	23.62	40.83	61.47	80.74	95.19	103.86	107.90	109.29	109.60
	<b>Área Agrícola</b>	95.57	86.01	68.81	48.17	28.90	14.45	5.78	1.73	0.35	0.03
<b>SZ2</b>	<b>Intensivo</b>	12.32	23.65	44.05	68.54	91.39	108.52	118.81	123.61	125.25	125.62
	<b>Área Agrícola</b>	113.34	102.01	81.61	57.12	34.27	17.14	6.85	2.06	0.41	0.04
<b>SZ3</b>	<b>Intensivo</b>	8.56	12.49	19.57	28.06	35.98	41.92	45.49	47.15	47.72	47.85
	<b>Área Agrícola</b>	39.30	35.37	28.30	19.81	11.88	5.94	2.38	0.71	0.14	0.01
<b>SZ1</b>	<b>Semi-intensivo</b>	13.47	23.03	40.23	60.88	80.14	94.59	103.26	107.31	108.70	109.01
	<b>Área Agrícola</b>	95.57	86.01	68.81	48.17	28.90	14.45	5.78	1.73	0.35	0.03
<b>SZ2</b>	<b>Semi-intensivo</b>	30.16	41.49	61.90	86.38	109.23	126.36	136.65	141.45	143.09	143.46
	<b>Área Agrícola</b>	113.34	102.01	81.61	57.12	34.27	17.14	6.85	2.06	0.41	0.04
<b>SZ3</b>	<b>Semi-intensivo</b>	13.05	16.98	24.06	32.54	40.47	46.41	49.97	51.64	52.21	52.34
	<b>Área Agrícola</b>	39.30	35.37	28.30	19.81	11.88	5.94	2.38	0.71	0.14	0.01

Los escenarios considerados y presentados en la **Tabla 37**, se esquematizan en las **Figura 35**, **Figura 36** y **Figura 37** mostrando los valores de  $D$  y  $CUD$  calculados para cada escenario propuesto en conjunto con los umbrales establecidos para ( $D_{min}$ ,  $CU_{min}$ ,  $CUD_{max}$ ). Las líneas continuas mostradas en cada una de las figuras que se presentan a continuación representan los valores de  $D$  y  $CUD$  para las combinaciones óptimas de SUDS (Ver **Tabla 22**).

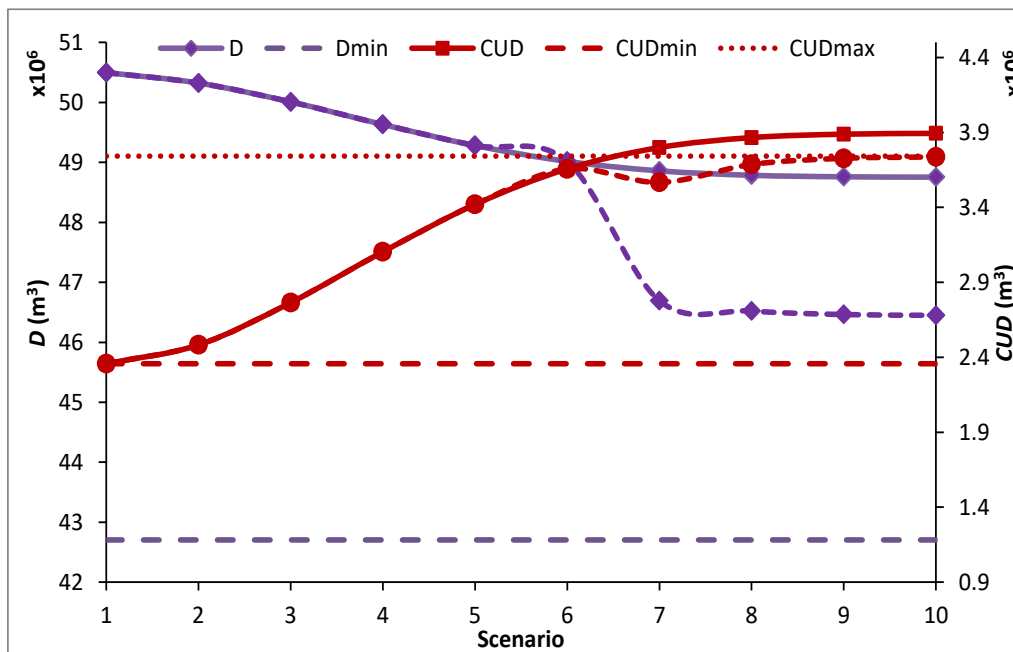
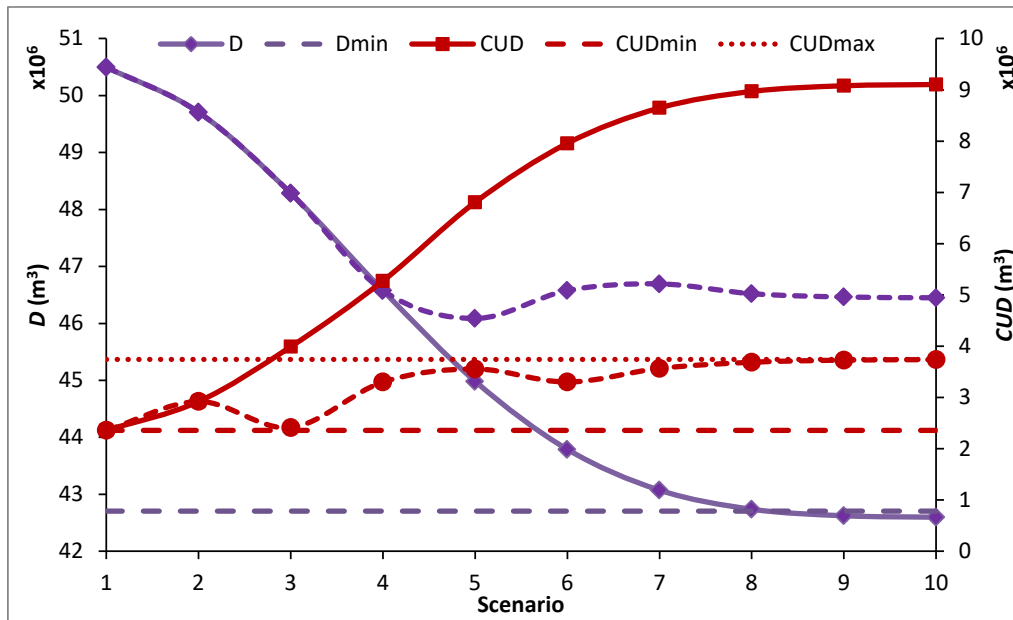


Figura 35. Valores D y CUD resultantes y umbrales propuestos para SZ1, permitiendo el incremento del uso residencial intensivo (arriba) o semi-intensivo (abajo).



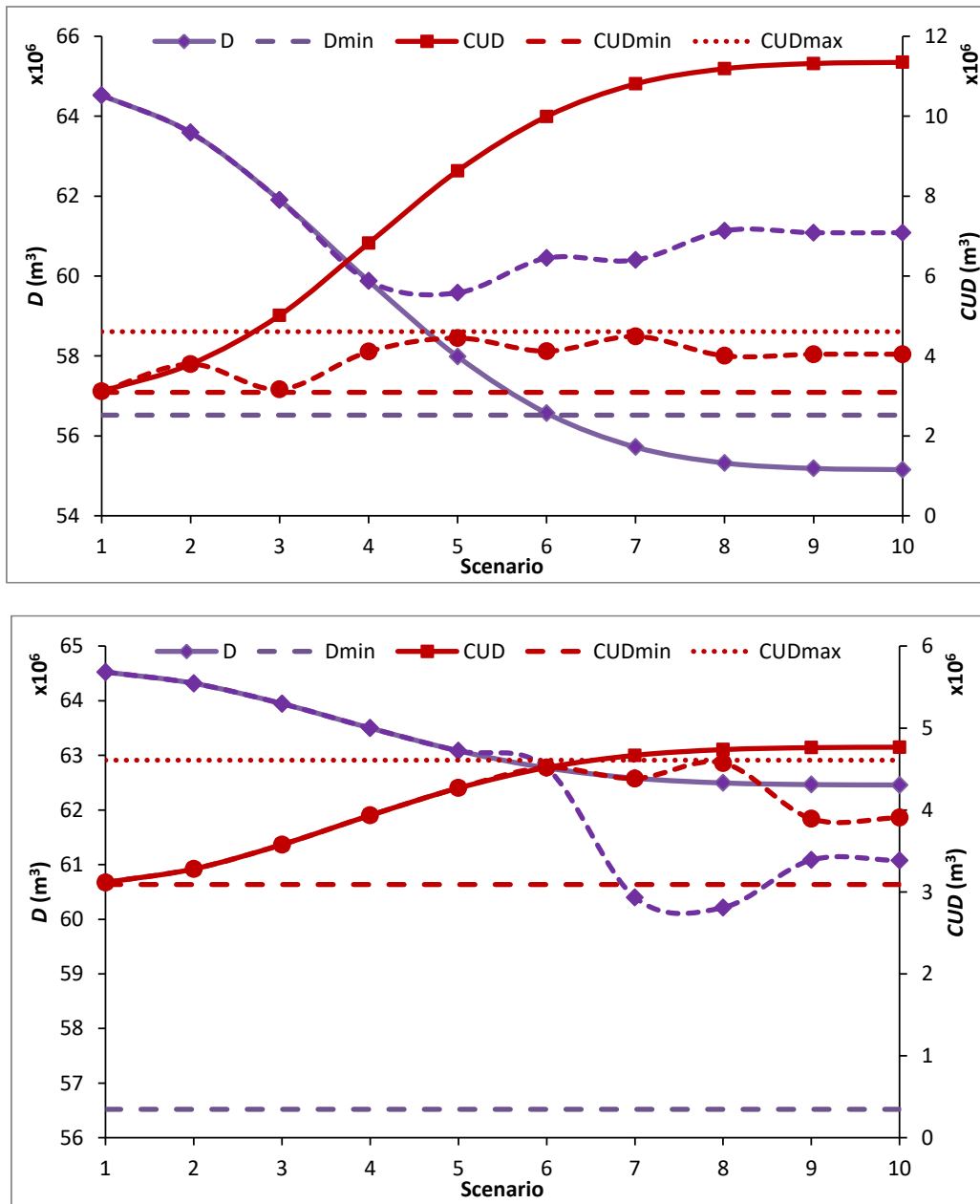
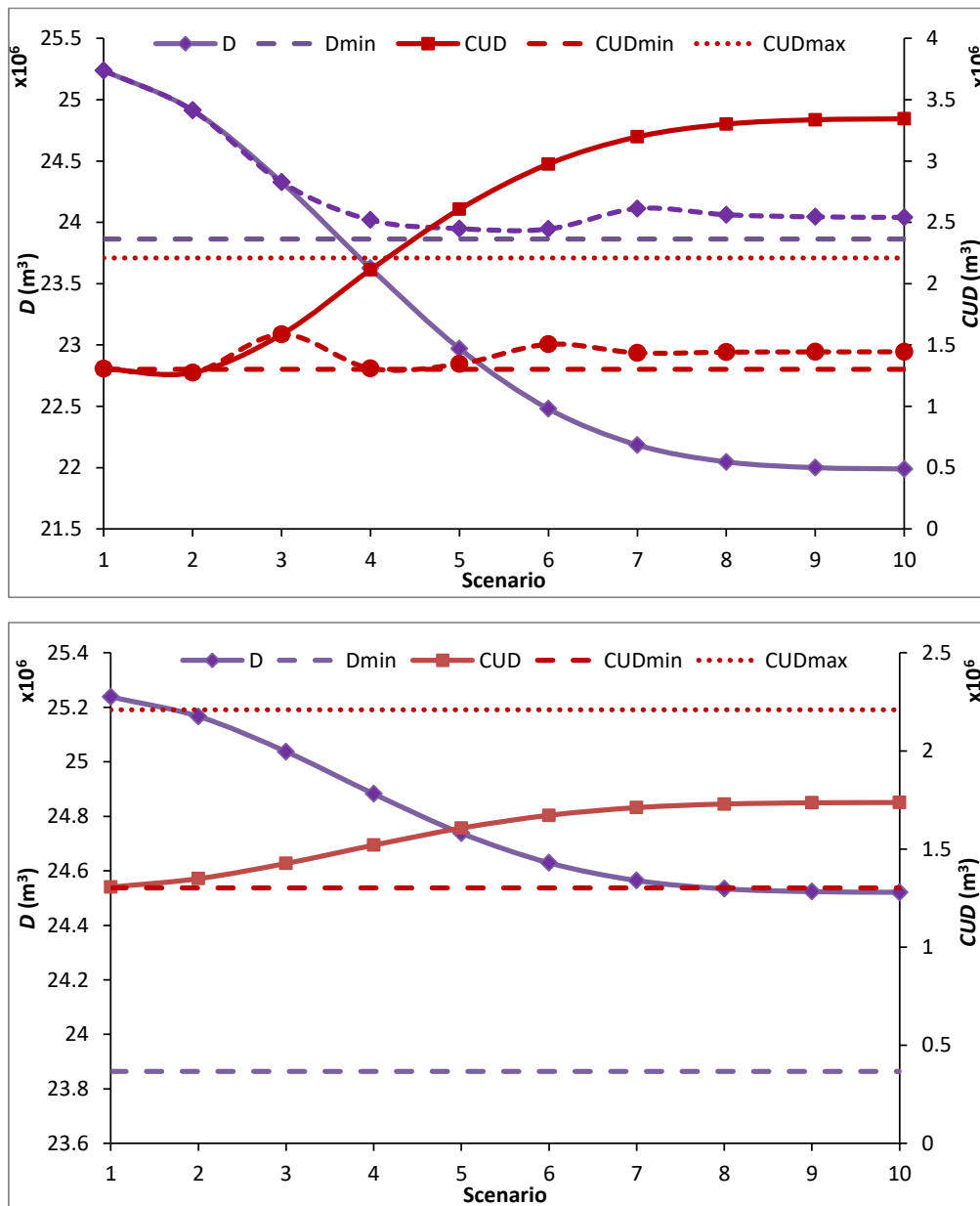


Figura 36. Valores D y CUD resultantes y umbrales propuestos para SZ2, permitiendo el incremento del uso residencial intensivo (arriba) o semi-intensivo (abajo).

Desarrollar áreas urbanas semi-intensivas a expensas de áreas de agricultura no implica incumplir los objetivos propuestos excepto en SZ1 y SZ2 donde los valores de CUD exceden los límites superiores para desarrollos mayores a los considerados en los escenarios 2 y 6, respectivamente. Por el contrario, los desarrollos residenciales intensivos rompen con mayor frecuencia los objetivos; CUD por encima del escenario 2 y D por encima del escenario 9 en SZ1;

$CUD$  por encima del escenario 2 y  $D$  por encima del escenario 7; SZ2 y  $CUD$  por encima del escenario 4 y  $D$  por encima del escenario 3 en SZ3.



**Figura 37.** Valores  $D$  y  $CUD$  resultantes y umbrales propuestos para SZ3, permitiendo el incremento del uso residencial intensivo (arriba) o semi-intensivo (abajo).

Las líneas discontinuas presentadas en las **Figura 35**, **Figura 36** y **Figura 37**, muestran los valores de  $D$  y  $CUD$  para la nueva combinación óptima (más barata) de  $kgr_{in}$ ,  $kpp_{in}$  y  $k_{in}$  (desarrollos residenciales intensivos) o  $kgr_{sin}$ ,  $kpp_{sin}$  y  $k_{sin}$  (desarrollos residenciales semi-intensivos) requerida para los desarrollos de toda la cuenca para cumplir con los limites originales i.e., a cada

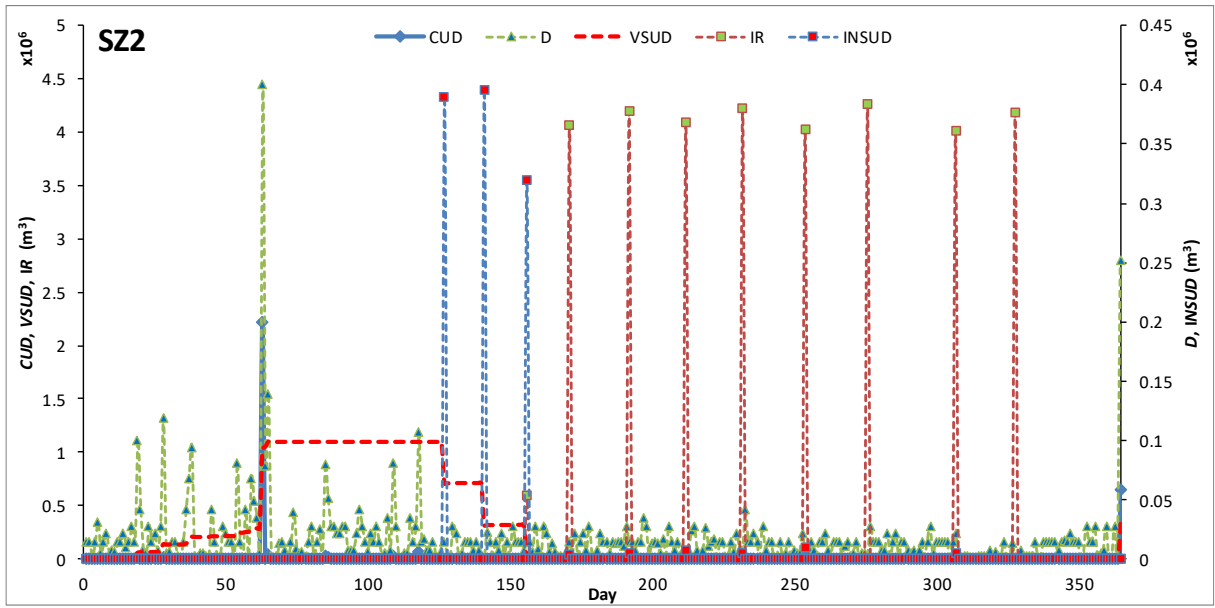
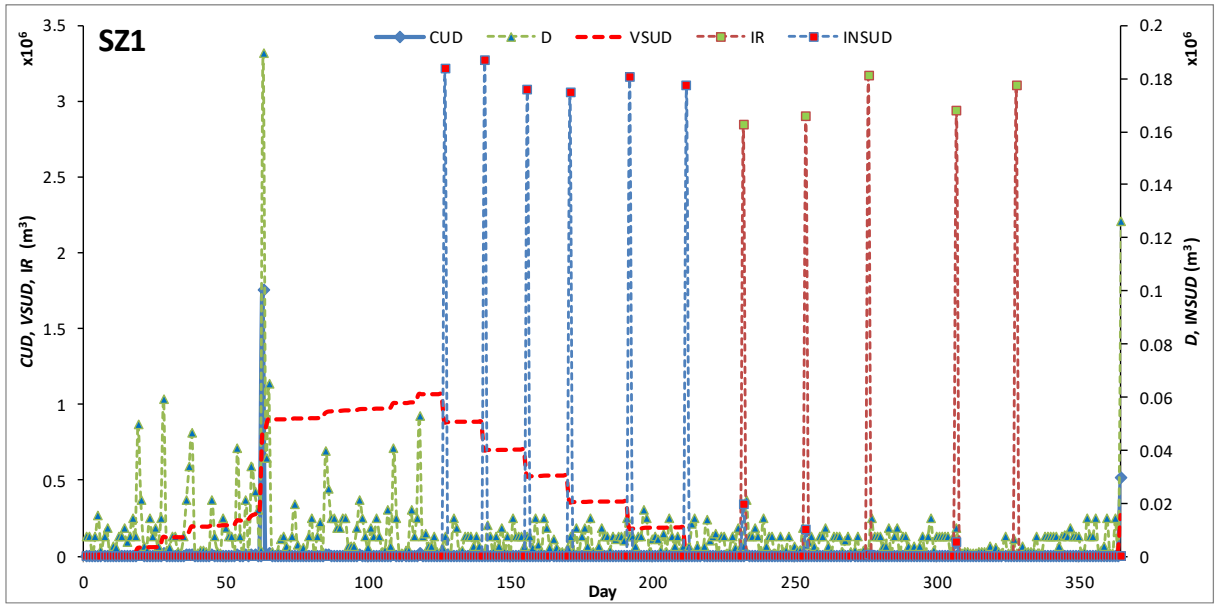
nuevo desarrollo urbano que altere el balance hídrico y que no cumpla con los objetivos establecidos para  $D$  y/o  $CUD$ , se le requerirá que proporcione una combinación de SUDS tal que toda la cuenca cumpla con los objetivos originales.

La **Tabla 38** presenta la nueva combinación de SUD óptima (costo mínimo) requerida para que los nuevos desarrollos de la cuenca alcancen los objetivos originales.

**Tabla 38.** Combinación óptima de  $kpp_{in}$ ,  $kgr_{in}$ ,  $k_{in}$  o  $kpp_{sin}$  y  $kgr_{sin}$ ,  $kpp$  y  $k_{sin}$  para nuevos desarrollos.

Captación	Escenario	$kpp_{in}$	$kgr_{in}$	$k_{in}$	$kpp_{sin}$	$kgr_{sin}$	$k_{sin}$	
SZ1	3	0	0	0.8				
	4	0	0	0.9				
	5	0.2	0	0.9				
	6	0	0	0.9				
	7	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0	
	8	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0	
	9	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0	
	10	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0	
	SZ2	3	0	0	0.9			
		4	0	0	0.9			
5		0.1	0.1	0.9				
6		0.2	0.2	0.9				
7		0.1	0.3	0.9	0.1	0.3	0	
8		0.2	0.3	0.9	0.1	0.3	0	
9		0.2	0.3	0.9	0.2	0.3	0	
10		0.2	0.3	0.9	0.2	0.3	0	
SZ3	4	0.1	0.1	0.8				
	5	0	0.3	0.8				
	6	0.1	0.3	0.7				
	7	0.2	0.3	0.7				
	8	0.2	0.3	0.7				
	9	0.2	0.3	0.7				
	10	0.2	0.3	0.7				

Los desarrollos urbanos son principalmente necesarios para detener y reutilizar la escorrentía y, cuando sea necesario, también se requieren pavimentos permeables y cubiertas verdes para preservar los valores impuestos para  $D$  y  $CUD$ . La **Figura 38** muestra la evolución esperada de las principales variables de balance hídrico para los datos climatológicos medios diarios y para  $\theta_0 = 0.2$  y  $VSUD_{MAX} = 0$  en  $t = 0$ .



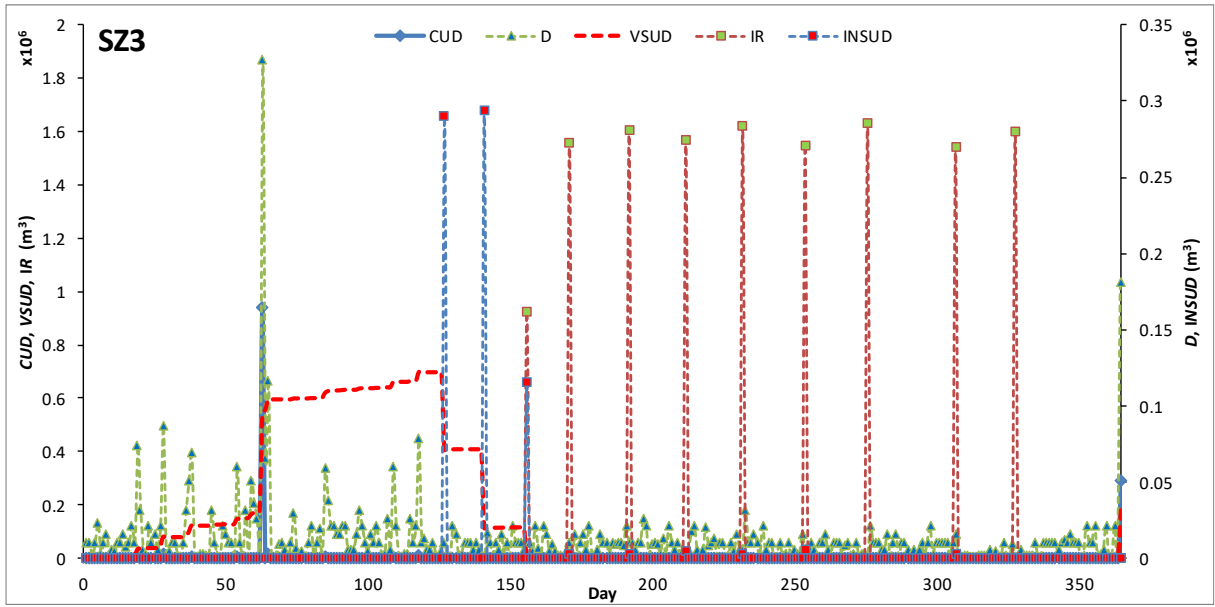


Figura 38. Evolución anual de CUD, D, VSUD, IR e INSUD para las tres cuencas (subsectores) analizadas.

Es observable un patrón similar en las tres cuencas analizadas: el valor de *VSUD* está siendo llenado durante la parte inicial del año, suministrando agua para cumplir con los requisitos de riego de tres eventos de riego (*INSUD*) en *SZ2* y *SZ3* y seis eventos en *SZ1*. El valor de  $VSUD_{MAX}$  casi es vaciado después de 210, 150 y 160 días en *SZ1*, *SZ2* y *SZ3* respectivamente, de los cuales el riego es suministrado principalmente por fuentes externas. *D* y *CUD* responden al patrón de precipitación, aunque se ven atenuados en el caso de *CUD* como resultado de la captación de escorrentía por SUDS.

Los resultados pueden variar cuando se centra en eventos de lluvia específicos en lugar de la evolución agregada diaria. La **Figura 39**, representa el funcionamiento de los elementos de almacenamiento de los SUDS y la descarga de escorrentía a *CUD* para un evento de tormenta de 1.1 horas de duración de 5 y 100 años de periodos de retorno y para las combinaciones óptimas de SUDS. La evolución esperada para los valores de *CUD* en el predesarrollo (actual) y la descarga de escorrentía a los cursos ecológicos de agua del estado hipotético original (sólo las áreas destinadas a la agricultura) al igual son representados en la **Figura 39**.

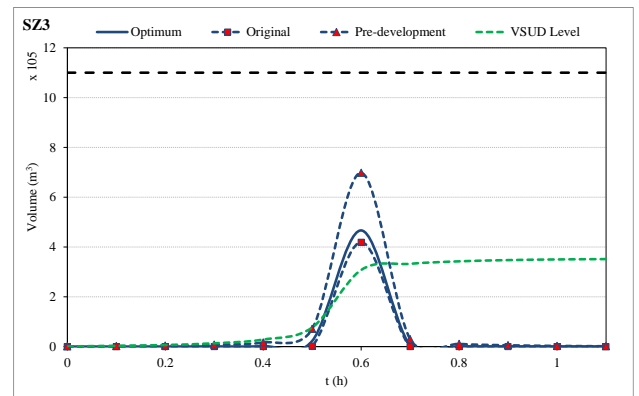
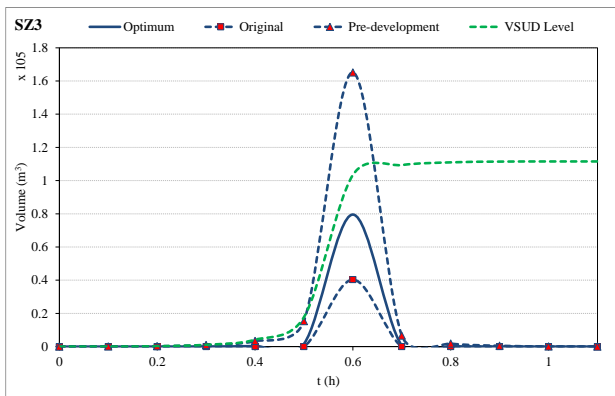
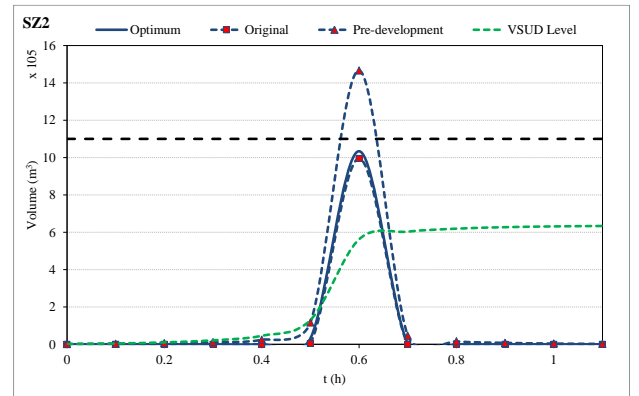
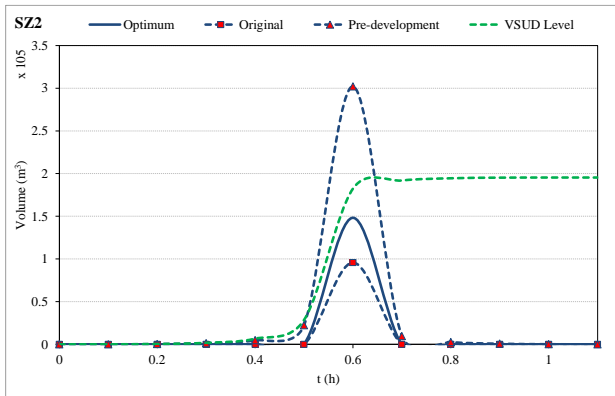
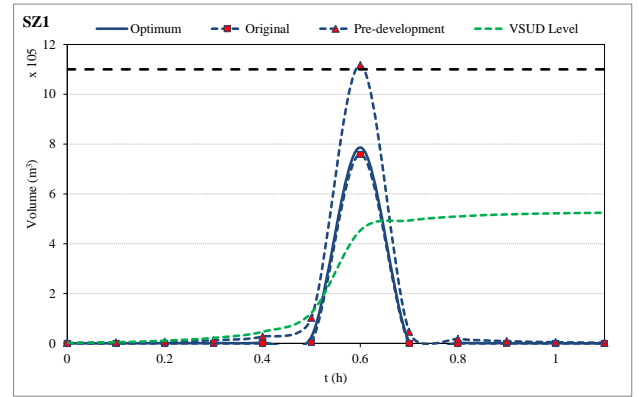
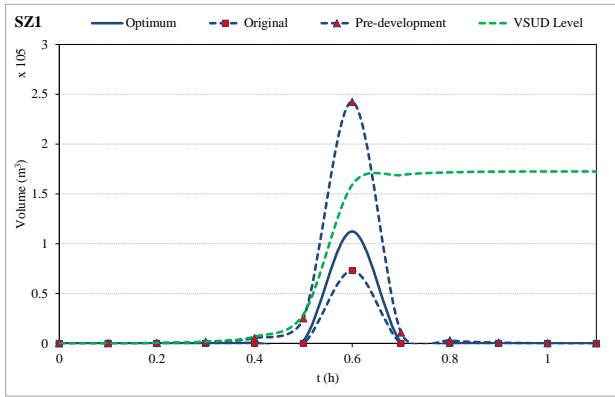
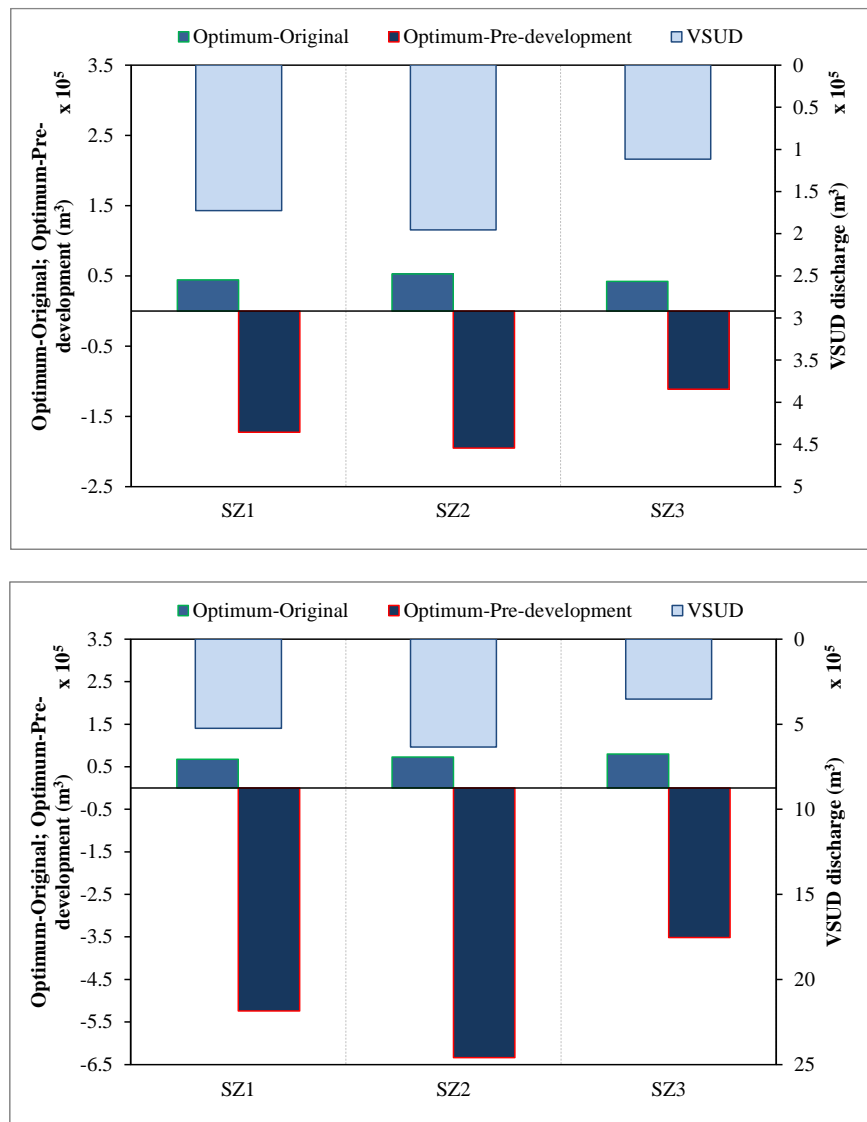


Figura 39. Nivel CUD y SUD para 5 (columna izquierda) y 100 (columna derecha) período de retorno, 1.1 h de duración, eventos de tormenta

La presencia de SUDS contribuye a la reducción del flujo máximo en cualquiera de las tres cuencas establecidas y periodo de retorno en comparación con la situación actual del predesarrollo.

El valor de  $VSUD_{MAX}$  no se rellena en ninguno de los casos. El pico de flujo observado con la combinación óptima de SUDS no se retrasa con respecto a los casos originales o previos al desarrollo porque la escorrentía no es captada completamente y, por lo cual, se descarga continuamente a *CUD*.

La **Figura 40**, presenta el aumento, o reducción, del volumen de los eventos de lluvia analizados como resultado de la combinación óptima de SUDS y el volumen almacenado en *VSUD* durante los mismos eventos.



**Figura 40.** Diferencia de volumen descargado a CUD entre la combinación óptima de SUDS y la situación original o previas al desarrollo para eventos de lluvia de período de retorno de 5 años (arriba) y 100 años (abajo).

A partir de la **Figura 40**, también se puede observar que las soluciones óptimas propuestas ayudan a imitar la situación original del suelo con respecto al volumen descargado, por lo que se cumplirían los requisitos tradicionales para el diseño de los SUDS (corroborar p.ej. (Zubelzu et al., 2019)).

#### 4.7. Discusión y análisis de resultados.

Se ha abordado el estudio de la combinación óptima de SUDS a nivel ciudad para cumplir con los objetivos económicos e hidrológicos de los sistemas de drenaje. Para esto, se desarrolló un código en Python® en lugar de utilizar algún otro modelo ya establecido p.ej. SWMM (Her et al., 2017; Mei et al., 2018). El modelo propuesto brinda una mayor flexibilidad para realizar estudios específicos, como el establecimiento hipotético de nuevos desarrollos urbanos, para garantizar el cumplimiento de los objetivos hidrológicos originales/iniciales del sitio.

Si bien la ZMSLP no cuenta con una red de monitoreo para la calibración y validación de los resultados obtenidos, las estimaciones concuerdan con la información obtenida de las plantas de tratamiento (ver **Tabla 18**), considerándose como una validación indirecta del desempeño del modelo establecido. Idealmente, los procesos de validación son necesarios para asegurar la idoneidad de las hipótesis o supuestos y deben incorporarse si están disponibles.

El enfoque que se presenta va dirigido a la provisión óptima de SUDS desde una perspectiva amplia sin limitaciones relacionadas a costos, recarga del acuífero y contribución a los caudales de agua. Este enfoque busca proporcionar la mejor combinación de SUDS, que va destinado a imitar el estado natural previo al desarrollo. Otros autores se han centrado en encontrar la mejor combinación de SUDS entre un conjunto específico de SUDS (Her et al., 2017; Palla & Gnecco, 2015), o en determinar la ubicación óptima de SUDS en un desarrollo (Mitchell, 2006).

En esta investigación no se especifican e indican las pautas sobre donde ubicar las instalaciones de SUDS ni se propone un conjunto específico de SUDS. La investigación se centra en toda la cuenca urbana de la ZMSLP y se define la solución óptima en términos de costos mínimos de implementación, recarga del acuífero de acuerdo con los datos de disponibilidad de agua subterránea extraída (ver **Tabla 16**) y la contribución a los cursos naturales de agua. Tres grupos de SUDS han sido considerados, estos comprenden la mayoría de las instalaciones destinadas a captar y reutilizar localmente la escorrentía pluvial y/o al aumento de las tasas de infiltración del suelo. A



demás, es posible la incorporación de otras instalaciones de SUDS, cuidando adecuadamente su efecto en cada variable del balance hídrico dentro de la ciudad.

A través del método propuesto se obtiene la combinación óptima de los SUDS (ver **Tabla 36**. Principales variables de balance hídrico para una combinación óptima de SUDS.) al comparar los resultados de cada combinación potencial del SUD en su estado actual de desarrollo y las condiciones hipotéticamente originales previas al desarrollo del área urbana. Esto permitió el establecimiento de criterios generales que pueden ser cumplidos por algún otro desarrollo urbano futuro que se genere dentro de la ZMSLP con la finalidad de preservar los objetivos originales del sitio. Como resultado de esto, se estimó la combinación óptima de SUDS necesaria para cualquier desarrollo urbano potencial con el objetivo de garantizar que toda la cuenca cumpla con los criterios originales (ver **Tabla 38**).

La solución resultante es sensible a los costos y las combinaciones óptimas de SUDS que se obtuvieron solo son válidas para la ZMSLP. Los costos establecidos e inclusive el conjunto de costos considerados pueden no ser completamente adecuados para otras regiones del país. Las funciones de costos deben ser ampliamente analizadas para cada investigación y/o estudio y deben garantizar su coherencia temporal. Sin embargo, el marco teórico, basado en un enfoque multi-objetivo que abarca tanto objetivos económicos como hidrológicos, es válido para cualquier lugar.

Se puede suponer que, en promedio, las tasas óptimas de SUDS deducidas como:  $k_i$ ,  $kgr_i$ , y  $kpp_i$ , generaron los valores estimados de  $I$ ,  $CUD$  y  $D$ ; ya que se utilizó información climatológica representativa. Sin embargo, los volúmenes reales de  $I$ ,  $CUD$  y  $D$  con las combinaciones óptimas de SUDS dependen en gran medida de las variables climáticas. Ocasionalmente, los valores reales podrían desviarse de las estimaciones, ya que se utilizaron datos climáticos promedio para la deducción de las combinaciones óptimas de los SUDS. Aun así, los resultados agregados no deben diferir de las estimaciones siempre que los valores promedio se hayan calculado utilizando datos representativos de las condiciones climáticas locales

En esta investigación, se utilizó el valor medio de los intervalos ya que se asumió que esta métrica representaba mejor la naturaleza de la serie de datos obtenidos. Sin embargo, cualquier otro método que proporcione valores representativos debería ser válido en el mismo sentido.

Otros autores también han presentado varias metodologías Multi-Objetivo (Duan, Li, & Yan, 2016) o Multi-Criterio (Her et al., 2017; Wang et al., 2017) pero ninguna ha presentado limitaciones

integrales comparables a las que se establecieron en esta investigación. La mayoría de los estudios anteriores plantean criterios simples de minimización de costos o de riesgos de inundación, por ejemplo. Por el contrario, en este estudio se han incorporado criterios/objetivos orientados a la minimización de los costos e imitación de las condiciones naturales previas al desarrollo urbano en la ZMSLP. Esto implica la definición de un límite superior de inundación para evitar daños, un límite inferior también de inundación (o más al punto de descarga de cursos de agua) para asegurar los niveles de los caudales ecológicos y finalmente una recarga mínima del acuífero para cubrir las tasas de extracción.

El enfoque presentado en esta investigación difiere de los considerados en varios estándares, por ejemplo (Woods-Ballard et al., 2015), que solo define los umbrales de flujo máximo y el volumen para eventos de lluvia específicos. La metodología desarrollada no se enfoca en eventos de lluvia sino en la evolución diaria de las variables seleccionadas. A pesar de los diferentes enfoques de diseño, las soluciones óptimas deducidas también se verificaron para el cumplimiento de los objetivos propuestos para dos eventos de lluvia, los cuales arrojaron resultados satisfactorios (ver **Figura 40**).

La planificación espacial y, particularmente, las políticas y estrategias de planificación urbana son los instrumentos más importantes para promover y alcanzar un desarrollo sostenible en la ZMSLP. La adopción de un enfoque holístico e integral para la gestión de aguas superficiales mediante SUDS mejora la gestión del agua y la protección al medio ambiente a un nivel estratégico y contribuye a los objetivos de biodiversidad y servicios (Woods-Ballard et al., 2015).

#### 4.7.1. Desafíos y perspectivas futuras.

##### 4.7.1.1. Principales Desafíos de los SUDS

El resultado de esta investigación y de las investigaciones consultadas que a pesar de los múltiples beneficios prometedores que los SUDS pudiesen proporcionar a las áreas urbanas, se pueden presentar una serie de desafíos que pueden inhibir la implementación a gran escala y el posible éxito a largo plazo de los enfoques de los SUDS. Entre los cuales se pueden identificar los siguientes:

## **Desafíos técnicos**

### **I. Bases sólidas de investigación**

Aunque se han realizado una gran cantidad de investigaciones a nivel global sobre la gestión sostenible de las aguas pluviales, las bases de investigación en México para la implementación de SUDS a gran escala es bastante débil, basándose así en muy pocas investigaciones a escala local y nacional. Como se mencionó con anterioridad, los SUDS cuentan con un enfoque integral que involucra múltiples conceptos; tales como la conservación de la funcionalidad del entorno natural, la gestión de los recursos hídricos urbanos, la regulación de la escorrentía pluvial, el amortiguamiento de los impactos de la urbanización y las actividades antropogénicas en el medio ambiente.

La carencia de bases sólidas de investigación restringe en gran medida los posibles beneficios de la gestión de los recursos hídricos a nivel ciudad. Y que para una implementación exitosa es necesario definir adecuadamente los objetivos y la fundamentación adecuada para la comprensión de este enfoque (H. Li et al., 2017).

### **II. Modelos adaptables**

Si bien la aplicabilidad de los SUDS y sus enfoques son adaptables a cualquier condición climática, geográfica, hidrológica y superficial; las estrategias de implementación y la selección de las medidas más adecuadas deben considerarse de acuerdo con el contexto local. Su éxito dependerá de las condiciones locales y no pueden ser transferibles de manera generalizada a otro contexto por más similar que este sea, ya que pudiesen ser no tan exitoso a medida que cambian las condiciones locales. Es entonces que las estrategias SUDS deben ser desarrolladas a través de la evaluación y el análisis de las condiciones locales con el objetivo de reducir la problemática y aprovechar los recursos regionales de la mejor manera.

### **III. Necesidad de educación, orientación y formación**

La falta de estándares, códigos y guías de diseño de SUDS a nivel local limitan la capacidad de las comunidades en la implementación de proyectos con enfoques SUDS. Además, el desafío técnico más común sea la falta de educación/capacitación, conocimiento y experiencia en la planificación, el diseño, la construcción, el mantenimiento y la maximización de los beneficios provistos por los SUDS en todas las escalas, yendo desde lo gubernamental, hasta todas aquellas profesiones relacionadas en el ámbito. Teniendo como resultado el escepticismo a los enfoques SUDS y/o

produce un desarrollo diferente en cuanto a las estrategias de gestión de los recursos hídricos urbanos.

La falta de conocimiento puede resultar en la implementación de estrategias inapropiadas y en una mala planificación y diseño SUDS en un contexto local; restringiendo la capacidad de otros sistemas previamente instalados y reducir la efectividad de la estrategia como tal. Otro de los problemas pudiese ser el uso excesivo de medidas ecológicas en lugares inapropiados o innecesarios

#### IV. Baja disponibilidad de componentes y materiales SUDS

La infraestructura sostenible o verde ha tenido gran auge en países desarrollados como Europa y E.E. U.U., desarrollándose así una serie de componentes que ayudan a la implementación de los SUDS. La mayoría de estos componentes cumplen con estándares industriales en cuanto a diseño y funcionamiento, lo que los hace fáciles de instalar, operar y mantener; además de alcanzar un buen rendimiento, el cual es estable, constante y monitoreable (H. Li et al., 2017).

En la actualidad en México hay muy pocos componentes que ayuden al enfoque holístico de los SUDS; en la mayoría de los casos estos enfoques se introducen principalmente mediante el uso de softwares diseñados por otros países y a través de técnicas de diseño e implementación adquiridas de manuales de ciudades europeas y del Reino Unido. La ausencia o carencia de componentes infraestructurales para SUDS en el país obstaculiza en gran medida el progreso de la implementación/construcción de SUDS y reduce la eficiencia de sus enfoques.

#### V. Insuficiencia de datos de rendimiento y validación

Al ser un enfoque nuevo, la existencia de datos de rendimiento y validación a largo plazo para los SUDS no están disponibles en las distintas regiones de México. Donde las ciudades no están seguras en la incorporación de los enfoques SUDS como parte del proceso de desarrollo urbano. Aunado a esto, la información sobre el gasto económico y los requerimientos de operación – mantenimiento bajo diferentes contextos urbanos tampoco están disponibles y en la actualidad no hay suficiente información sobre el desempeño de los SUDS como estrategias de gestión y tampoco de lo que pudiera ser necesario para el mantenimiento de sus diversas funciones.

#### VI. Operación y mantenimiento.

Comparando a los sistemas tradicionales de gestión de aguas pluviales, los SUDS pueden requerir un mantenimiento periódico más frecuente. Lo que varía según las medidas específicas, a su funcionalidad y a las condiciones locales.

### **Desafíos físicos**

Algunos de los SUDS pueden no ser adecuados en ciertos lugares debido a las características físicas del suelo, el clima u otras condiciones específicas. P.ej. en sistemas relacionados con la infiltración no deben ser utilizados en áreas donde la infiltración no es deseable a menos que se tomen medidas especiales de implementación; en zonas áridas y semiáridas, ciertos SUDS que aumentan la evaporación tampoco son deseables. Estas limitantes crean desafíos en el diseño y construcción de SUDS en el desarrollo urbano.

La poca disponibilidad de espacios en áreas urbanas y al considerar que los sistemas convencionales de drenaje transportan las aguas pluviales a través de redes subterráneas, los SUDS que permiten la infiltración del suelo o el almacenamiento en el sitio, pueden requerir espacio adicional; lo que puede presentar desafíos en el diseño de nuevos desarrollos urbanos o en el reacondicionamiento del espacio urbano existente.

Un desafío muy explícito es la falta de comprensión de las características del suelo, su conservación y restauración del suelo y las relaciones planta-suelo-agua. Estas características pueden ser un impedimento fundamental para los SUDS porque es difícil de lograr un enfoque sostenible, ya que es necesario un diseño más detallado, en donde los posibles beneficios provistos se reducen en gran medida.

### **Desafíos financieros**

A pesar de que los costos de diseño y construcción de SUDS son claros, existe un desconocimiento respecto a los costos de su ciclo de vida, incluyendo la operación y mantenimiento. De ser así, la incertidumbre de la vida útil y el rendimiento de los sistemas, los beneficios del ciclo de vida, incluyendo los beneficios ambientales, ecológicos y sociales, no pueden ser evaluados de manera eficiente. Lo que representa un riesgo financiero bastante alto para las entidades públicas y/o privadas interesadas.

#### 4.7.1.2. Perspectivas futuras de los SUDS

Debido a que los SUDS se presentan como un nuevo enfoque para la gestión de los recursos hídricos, el éxito de su implementación en áreas urbanas de México se basa en la identificación de los desafíos y en la adaptación de mejoras eficientes. Para continuar hacia un futuro sostenible, se identifican las siguientes oportunidades futuras:

- I. La adopción de un enfoque integral a escala de cuencas hidrográficas que se centre en la conectividad de las escalas fuente-comunidad-región-cuenca.
- II. La mejora de los estándares de diseño y orientación para las condiciones locales basados en la evaluación del contexto local con aportes de desarrolladores, planificadores e ingenieros locales.
- III. El establecimiento de programas educativos que brinden capacitación a funcionarios gubernamentales, empleados de obras públicas, planificadores, diseñadores y al público en general.
- IV. Promoción de liderazgo gubernamental y la cooperación interinstitucional para la identificación de la necesidad de un cambio de enfoque para la gestión sostenible de los recursos disponibles a nivel local.
- V. El establecimiento de un marco legislativo que este en función de las condiciones locales.
- VI. La generación de opciones de financiamiento que adopten un modelo que considere las diversas condiciones naturales y situaciones económicas locales.
- VII. Investigación continua sobre los conceptos y prácticas SUDS a nivel nacional, regional y local.

El desarrollo de nuevos enfoques que sean adaptables en las ciudades como son los SUDS llevara tiempo. Es necesario tiempo para formar profesionales y educar a la población; es necesario tiempo para el aprendizaje paso a paso, incluido el aprendizaje de experiencias anteriores. Es posible que con orientación y con ajustes adecuados, se puedan superar los desafíos presentes y se tengan resultados en la reducción de las barreras técnicas, legales, financieras y culturales. Pues a medida que se vaya comprendiendo más, se reducirá la incertidumbre de estos sistemas (H. Li et al., 2017).

## Conclusiones

Se propuso una metodología de análisis Multi-Objetivo en el cual se contemplan los criterios económicos e hidrológicos para la estimación de la combinación óptima de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible a una escala ciudad para la Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

Los criterios económicos de diseño se incorporan mediante una función de costos unitarios los que abarcan costos de instalación, operación y mantenimiento de los SUDS seleccionados e implementados. En cuanto a los criterios hidrológicos, consistieron en el establecimiento de límites para asegurar las tasas mínimas de recarga al acuífero subterráneo y límites superiores e inferiores a los valores de escorrentía pluvial para la prevención de daños por inundación y para asegurar la contribución mínima de escorrentía pluvial a los cursos o caudales naturales/ecológicos presentes en el área de estudio. Se desarrollo y aplicó un modelo conceptual basado en un balance hídrico volumétrico para la estimación de la evolución diaria de los procesos hidrológicos dentro del área urbana de la ZMSLP.

El método está basado en captaciones/cuencas urbanas divididas en tres subsectores y se obtiene la combinación óptima de SUDS tomando en cuenta las instalaciones reales de captación y reutilización (instalaciones de infiltración, jardines de lluvia o similares), cubiertas verdes y pavimentos permeables. Se probó la validez del método y el marco teórico general para encontrar la solución óptima de SUDS en tres cuencas urbanas de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (México). En este caso, las soluciones óptimas promovieron la detención y reutilización de la escorrentía superficial sobre pavimentos permeables y cubiertas verdes.

Existen puntos clave que deben perfeccionarse para cada aplicación y que deben considerarse cuidadosamente, especialmente: la identificación de estadísticas representativas para incorporar información climática y definir el conjunto adecuado de datos representativos que garanticen su coherencia temporal y conceptual.

Se estimaron los requerimientos para futuros desarrollos urbanos dentro de toda la cuenca estudiada para seguir cumpliendo los objetivos hidrológicos originales del sitio. Esto permite incorporar criterios integrales para la planificación de SUDS para alcanzar los objetivos de sostenibilidad de las cuencas hidrográficas urbanas a ser preservadas por nuevos desarrollos urbanos potenciales.

Es importante mencionar que el funcionamiento real de las instalaciones de SUDS podrían diferir de las estimaciones del modelo ya que se utilizaron datos climatológicos promedio. A pesar de ello, se verificaron las condiciones de operación de los SUDS durante eventos de lluvia específicos y los resultados mostraron su idoneidad para imitar prácticamente el estado previo al desarrollo urbano en la ZMSLP para periodos de retorno de 5 y 100 años y eventos de lluvia de 1.1 h de duración (ver **Figura 40**).



## Referencias

- Aboites-Aguilar, L. (2010). Estudio sobre desigualdad social y cambio político en México. Segunda mitad del siglo XX, México. *Investigaciones Geográficas*, (2009), 145–148. <https://doi.org/10.4000/nuevomundo.60111>
- Academia Mexicana de Ciencias. (2010). *El agua en México: Cauces y encauces* (1st ed.; B. Jiménez-Cisneros, M. Torregrosa y Armentia, & L. Aboites-Aguilar, Eds.). México.
- AECOM. (2013). *Water, people, places. A guide for master planning SuDS into developments, prepared by the Lead Local Flood Authorities of the South East of England*. Retrieved from [http://www.susdrain.org/files/resources/other-guidance/water\\_people\\_places\\_guidance\\_for\\_master\\_planning\\_sustainable\\_drainage\\_into\\_developments.pdf](http://www.susdrain.org/files/resources/other-guidance/water_people_places_guidance_for_master_planning_sustainable_drainage_into_developments.pdf)
- Anderson, P. M. L., Okereke, C., Rudd, A., & Parnell, S. (2013). Regional assessment of Africa. In *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities: A Global Assessment* (pp. 453–459). [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1\\_23](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1_23)
- Armitage, N., Carden, K., Winter, K., Naidoo, V., Spiegel, A., Mauck, B., & Coulson, D. (2014). *WSUD for South Africa Framework and Guidelines*.
- Asamblea Legislativa del Distrito Federal. *Ley de aguas del Distrito Federal*. , (2003).
- Ashley, R., Lundy, L., Ward, S., Shaffer, P., Walker, L., Morgan, C., ... Moore, S. (2013). Water-sensitive urban design: Opportunities for the UK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 166(2), 65–76. <https://doi.org/10.1680/muen.12.00046>
- Ávila Morales, Á. (2013). *Ecotecnia Para Captación Y Reciclaje De Aguas Pluviales En Casas De Interés Social En Pachuca, Hidalgo* (Universidad Nacional Autónoma de México). Retrieved from <http://132.248.9.195/ptd2014/enero/0707391/0707391.pdf>
- Bai, Y., Li, Y., Zhang, R., Zhao, N., & Zeng, X. (2019). Comprehensive performance evaluation system based on environmental and economic benefits for optimal allocation of LID facilities. *Water (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/w11020341>
- Bhaduri, B., Minner, M., Tatalovich, S., ASCE, & Harbor, J. (2001). *Long-Term hydrologic impact of urbanization: A tale of two models*. 127(February), 13–19.
- Binesh, N., Niksokhan, M. H., Sarang, A., & Rauch, W. (2019). Improving sustainability of urban drainage systems for climate change adaptation using best management practices: a case study of Tehran, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 64(4), 381–404. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1585857>
- Burian, S. J., & Edwards, F. G. (2002). Historical Perspectives of Urban Drainage. *Computer*, (479), 1–16. Retrieved from [https://pdfs.semanticscholar.org/e073/156af4624e4ad3171da15eb39078010c8705.pdf?\\_ga=2.265620495.1244231865.1567586958-1609799139.1567586958](https://pdfs.semanticscholar.org/e073/156af4624e4ad3171da15eb39078010c8705.pdf?_ga=2.265620495.1244231865.1567586958-1609799139.1567586958)
- Butler, D., & Parkinson, J. (1997). Towards sustainable urban drainage. *Water Science and Technology*, 35(9), 53–63. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00184-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00184-4)

- Carabine, E., Venton, C. C., Tanner, T., & Bahadur, A. (2015). *The contribution of ecosystem services to human resilience: A rapid review*. (February), 52.
- CCA. (2008). *Edificación sustentable en America del Norte*.
- Chang, N. Bin, Lu, J. W., Chui, T. F. M., & Hartshorn, N. (2018). Global policy analysis of low impact development for stormwater management in urban regions. *Land Use Policy*, 70(January), 368–383. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.024>
- Charlesworth, S. M., & Booth, C. A. (2013). Sustainable surface water management. A handbook for SUDS. In *Journal of Petrology* (Vol. 369). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CIRIA. (2012). *Retrofitting to manage surface water*. Retrieved from [www.ciria.org](http://www.ciria.org)
- CIRIA. (2017). Guidance on the Construction of SuDS. In C768. <https://doi.org/10.1021/jp052617e>
- CONAGUA. (2015). Inventario Nacional De Plantas Municipales De Potabilización Y De Tratamiento De Aguas Residuales En Operación. Diciembre 2014. *Semarnat*, 308.
- CONAGUA. (2016a). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Drenaje Pluvial Urbano*. Retrieved from <http://www.mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro19.pdf#page=>
- CONAGUA. (2016b). *Sistema de captación de abasto de agua Potable a nivel vivienda*.
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México: 2018*. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda. , PROCAPTAR § (2016).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Luis Potosí (2411), Estado de San Luis Potosí. In *Diario Oficial de la Federación*. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- Danish Hydraulic Institute - DHI. (2019). *Mike Urban Model Manager - User Guide*. 444.
- Del, P., Bilbao, D. E. L. A. D. E., Objeto, S., La, Y. F. D. E., Checa, M., & De Pazos, M. (2000). Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres. *Ayuntamiento de Madrid, 2012*, 11–33.
- Department for Environment Food and Rural Affairs. Flood and Water Management Act. , Water Management § (2010).
- Diario Oficial de la Federación. (2018). *Ley General del Equilibrio Ecológico y al Protección al Ambiente DOF-05-06-2018*. 1–302. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1055>
- Dietz, M. E. (2007). Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 186(1–4), 351–363. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z>
- Digman, C. (MWH), Ashley, R. (Pennine W. G., Balmforth, D. (MWH), Balmforth, D. (Susturb), Stovin, V. (University of S., & Glerum, J. (CIRIA). (2012). *Retrofitting to manage surface water*.
- Duan, H. F., Li, F., & Yan, H. (2016). Multi-Objective Optimal Design of Detention Tanks in the Urban

- Stormwater Drainage System: LID Implementation and Analysis. *Water Resources Management*, 30(13), 4635–4648. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1444-1>
- Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling and Software*, 22(3), 394–405. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.005>
- Estrada-Pérez, F. (2013). *El agua de San Luis Potosí, contaminación y saneamiento*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- FCCyT (Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC). (2012). *Diagnóstico del Agua en América* (Juan Pedro; M. A. Barragán-García, Ed.). Distrito Federal, México.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Garza, G., & Schteingart, M. (2010). Ciclos económicos y competitividad de las ciudades. In *Desarrollo urbano y regional*.
- Giacomini, M. H., & Joseph, J. (2017). Multi-objective evolutionary optimization and Monte Carlo simulation for placement of low impact development in the catchment scale. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(9), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000812](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000812)
- Goulden, S., Portman, M. E., Carmon, N., & Alon-Mozes, T. (2018). From conventional drainage to sustainable stormwater management: Beyond the technical challenges. *Journal of Environmental Management*, 219, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.066>
- Griffiths, J. A. (2017). Sustainable Urban Drainage. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (Vol. 2, pp. 403–413). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10203-9>
- Guevara-Gasca, V. A. (2007). *Distribución Espacial y Abastecimiento del Agua para Uso Humano, en el Área Metropolitana de La Ciudad de San Luis Potosí: Problemática, Implicaciones y Alternativas*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Hamdan, S. M. (2009). A literature based study of stormwater harvesting as a new water resource. *Water Science and Technology*, 60(5), 1327–1339. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.396>
- Her, Y., Jeong, J., Arnold, J., Gosselink, L., Glick, R., & Jaber, F. (2017). A new framework for modeling decentralized low impact developments using Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling and Software*, 96, 305–322. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.005>
- Hlavínek, P., & Zeleňáková, M. (2015). *Storm Water Management: Examples from Czech Republic, Slovakia and Poland* (P. Hlavínek & M. Zeleňáková, Eds.). Switzerland: Springer International.
- Huber, W. C., Heaney, J. P., Medina, M. A., Peltz, W. A., Sheikh, H., & Smith, G. F. (2015). Storm Water Management Model User'S Manuel. Version li. In *Environ Prot Technol Ser EPA*.
- Impluvium. (2014). Sistemas de captación de agua de lluvia. *Periódico Digital de Divulgación de La Red Del Agua UNAM*, p. 41.
- Interapas. (2013). *Gestión del Agua en la zona metropolitana de San Luis Potosí, Cerro de San Pedro*

y Soledad de Graciano Sánchez. 48. Retrieved from <http://www.interapas.mx/index.php/component/content/article/10-interapas/59-agua-en-mexico-y-san-luis-potosi>

- Interapas. (2018). Informe Anual 2018. In *Direccion General*. San Luis Potosí.
- Jacobo-Marín, D. (2013). *Agua para San Luis Potosí: Una mirada desde el derecho humano al agua en dos sectores del ámbito urbano* (El Colegio de San Luis). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2970.0009>
- Jiménez Abarca, V. (2017). Estudio de Factibilidad Técnico Económica de la Captación y Tratamiento de Agua de Lluvia en Zona Urbana. *Tesis de Maestría*. Retrieved from <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1683>
- Li, H., Ding, L., Ren, M., Li, C., & Wang, H. (2017). Sponge city construction in China: A survey of the challenges and opportunities. *Water (Switzerland)*, 9(9), 1–17. <https://doi.org/10.3390/w9090594>
- Li, Z., Dong, M., Wong, T., Wang, J., Kumar, A. J., & Singh, R. P. (2018). Objectives and indexes for implementation of sponge cities-A case study of Changzhou City, China. *Water (Switzerland)*, 10(5), 1–14. <https://doi.org/10.3390/w10050623>
- Limón Bandola, E. M. L. B. (2011). *Universidad Veracruzana*. Retrieved from <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46427/QuirozCortesMCarmen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Lindgren, J. (2019). *Evaluation of different methods for modelling stormwater quality*. Chalmers University of Technology.
- López-Álvarez, B. (2012). *Cambios de Uso de Suelo y su Impacto en el Sistema Acuífero del Valle de San Luis Potosí, Aplicando Modelacion Numérica*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.
- Luan, B., Yin, R., Xu, P., Wang, X., Yang, X., Zhang, L., & Tang, X. (2019). Evaluating Green Stormwater Infrastructure strategies efficiencies in a rapidly urbanizing catchment using SWMM-based TOPSIS. *Journal of Cleaner Production*, 223, 680–691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.028>
- Martínez Cuéllar, C. O. (2015). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS: Infraestructura hidráulica urbana para el control y aprovechamiento del agua de lluvia*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Matínez Torres, Y. (2018). *Crecimiento Urbano en San Luis Potosí Requerimientos para una ciudad emergente y sostenible*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Mei, C., Liu, J., Wang, H., Yang, Z., Ding, X., & Shao, W. (2018). Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed. *Science of the Total Environment*, 639, 1394–1407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.199>
- Méndez Hernández, K. R. (2017). *Estimación del uso y aprovechamiento del agua en el estado de San Luis Potosí a través de un modelo de distribución espacial*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- Meng, M., Dąbrowski, M., Tai, Y., Stead, D., & Chan, F. (2019). Collaborative spatial planning in the face of flood risk in delta cities: A policy framing perspective. *Environmental Science and Policy*, 96(March), 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.03.006>
- Mitchell, V. G. (2006). Applying integrated urban water management concepts: a review of Australian experience. *Environmental Management*, 37(5), 589–605. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1>
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Wang, X. C., Ren, N., Li, G., ... Liang, H. (2019). Implementation of a specific urban water management - Sponge City. *Science of the Total Environment*, 652, 147–162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168>
- OMS. (2008). *Guías para la calidad del agua potable*. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00006-6)
- ONU-Habitat. (2016). *Informe Final Municipal 2016. San Luis Potosí*. Ciudad de México, México.
- Ortiz-Moreno, J., Masera-Cerutti, O., & Fuentes-Gutiérrez, A. (2014). *La ecotecnología* (1st ed.). Morelia, Mexico.
- Palla, A., & Gnecco, I. (2015). Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 528, 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>
- Palla, A., & Gnecco, I. (2018). Green roofs to improve water management. In *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability* (pp. 203–213). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00019-7>
- Pappalardo, V., & La Rosa, D. (2020). Policies for sustainable drainage systems in urban contexts within performance-based planning approaches. *Sustainable Cities and Society*, 52(September 2019), 101830. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101830>
- Pappalardo, V., La Rosa, D., Campisano, A., & La Greca, P. (2017). The potential of green infrastructure application in urban runoff control for land use planning: A preliminary evaluation from a southern Italy case study. *Ecosystem Services*, 26(June 2016), 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.04.015>
- PCPE. (2007). *Modificación específica del plan del centro de población estrategico San Luis Potosí Soledad de Gaciano Sánchez*. San Luis Potosí.
- Perales-Momparler, C. S. (2015). *A regenerative urban stormwater management methodology. The Role of SUDS construction and monitoring in the transition of a mediterranean city*. 156.
- Perales-Momparler, S., Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Vallés-Morán, F., Martín, M., Escuder-Bueno, I., & Andreu, J. (2017). The role of monitoring sustainable drainage systems for promoting transition towards regenerative urban built environments: a case study in the Valencian region, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 163, S113–S124. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.153>
- Perales-Momparler, S., Calcerrada-Romero, E., Badenes-Catalán, C., & Beltrán-Pitarch, I. (2019). *Guía básica de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible para el término municipal de Castello de la Plana*. Castelló de la Plana.

- Pérez-Uresti, S. I., Ponce-Ortega, J. M., & Jiménez-Gutiérrez, A. (2019). A multi-objective optimization approach for sustainable water management for places with over-exploited water resources. *Computers and Chemical Engineering*, *121*, 158–173. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.10.003>
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. In *Información tecnológica* (Vol. 29). Retrieved from [http://eias.utelca.cl/isi/publicaciones/unam/pronostico\\_del\\_escurrecimiento.pdf](http://eias.utelca.cl/isi/publicaciones/unam/pronostico_del_escurrecimiento.pdf)
- Radcliffe, J. C. (2019). History of Water Sensitive Urban Design/Low Impact Development Adoption in Australia and Internationally. In *Approaches to Water Sensitive Urban Design* (pp. 1–24). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812843-5.00001-0>
- Raei, E., Reza Alizadeh, M., Reza Nikoo, M., & Adamowski, J. (2019). Multi-objective decision-making for green infrastructure planning (LID-BMPs) in urban storm water management under uncertainty. *Journal of Hydrology*, *579*(August), 124091. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124091>
- Rodríguez-Sinobas, L., Zubelzu, S., Perales-Momparler, S., & Canogar, S. (2018). Techniques and criteria for sustainable urban stormwater management. The case study of Valdebebas (Madrid, Spain). *Journal of Cleaner Production*, *172*, 402–416. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.070>
- Rossmann, L. A., & Huber, W. C. (2016). Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology (revised)(EPA/600/R-15/162A). In *U.S. Environmental Protection Agency: Vol. I* (p. 231). Retrieved from [www2.epa.gov/water-research](http://www2.epa.gov/water-research)
- Sakaguchi, I., Momose, T., & Kasubuchi, T. (2007). Decrease in thermal conductivity with increasing temperature in nearly dry sandy soil. *European Journal of Soil Science*, *58*(1), 92–97. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00803.x>
- saucedo Vidal, A. (2010). *Concreto hidráulico permeable , una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del valle de México.*
- Savard, J. P. L., Clergeau, P., & Mennechez, G. (2000). Biodiversity concepts and urban ecosystems. *Landscape and Urban Planning*, *48*(3–4), 131–142. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00037-2)
- Scalenghe, R., & Ajmone-Marsan, F. (2009). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, *90*(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.011>
- Schuetze, T. (2013). Rainwater harvesting and management - Policy and regulations in Germany. *Water Science and Technology: Water Supply*, *13*(2), 376–385. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.035>
- SEDATU, CONAPO, & INEGI. (2015). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015.*
- Shrivastava, P. (2016). Urban water hydrological modelling. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, *7*(2), 489–493. <https://doi.org/10.21172/1.72.576>
- Stevens Vázquez, Guillermo Sigfrido. (2014). La vulnerabilidad hídrica en la ciudad de San Luis Potosí.

- Un análisis espacial. *Revista de El Colegio de San Luis*, (4), 130. <https://doi.org/10.21696/rcsl042012530>
- Stevens Vázquez, Guillermo Sigifrido. (2012). La vulnerabilidad hídrica en San Luis Potosí. *Revista El Colegio de San Luis*, 4, 30.
- Tecnología ASSUL. (2005). *Estudio de Diagnostico y Planeación Integral*. San Luis Potosí, México.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. In *ST/ESA/SER.A/420* (Vol. 12). <https://doi.org/10.4054/demres.2005.12.9>
- Vargas Parra, M. V. (2015). *Optimizing Rainwater Harvesting Systems in Urban Áreas*. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Wang, M., Sweetapple, C., Fu, G., Farmani, R., & Butler, D. (2017). A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives. *Journal of Environmental Management*, 201, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.034>
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Woods Ballard, B., Construction Industry Research and Information Association, Great Britain, Department of Trade and Industry, & Environment Agency. (2015). The SUDS manual. In *Ciria*, .... Retrieved from <http://www.persona.uk.com/A47postwick/deposit-docs/DD-181.pdf>
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. París.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. Retrieved from [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/AGUA,\\_SANEAMIENTO\\_e\\_HIGIENE.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/AGUA,_SANEAMIENTO_e_HIGIENE.pdf)
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. Retrieved from <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y cambio climático*.
- Xu, T., Engel, B. A., Shi, X., Leng, L., Jia, H., Yu, S. L., & Liu, Y. (2018). Marginal-cost-based greedy strategy (MCGS): Fast and reliable optimization of low impact development (LID) layout. *Science of the Total Environment*, 640–641(May), 570–580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.358>
- Xu, T., Jia, H., Wang, Z., Mao, X., & Xu, C. (2017). SWMM-based methodology for block-scale LID-BMPs planning based on site-scale multi-objective optimization: a case study in Tianjin. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 11(4). <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0934-6>
- Zhou, Q. (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water (Switzerland)*, 6(4), 976–992. <https://doi.org/10.3390/w6040976>

Zubelzu, S., Rodríguez-Sinobas, L., Andrés-Domenech, I., Castillo-Rodríguez, J. T., & Perales-Momparler, S. (2019). Design of water reuse storage facilities in Sustainable Urban Drainage Systems from a volumetric water balance perspective. *Science of the Total Environment*, 663, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.342>




## Anexo1.



Article

## Multi-Objective Approach for Determining Optimal Sustainable Urban Drainage Systems Combination at City Scale. The Case of San Luis Potosí (México)

Sergio Zubelzu <sup>1,\*</sup>, Leonor Rodríguez-Sinobas <sup>1</sup>, Alvaro Sordo-Ward <sup>2</sup> , Alan Pérez-Durán <sup>3</sup> and Rodolfo Cisneros-Almazán <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, Spain; leonor.rodriguez.sinobas@upm.es

<sup>2</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Calle del Prof. Aranguren, 3, 28040 Madrid, Spain; alvaro.sordo.ward@upm.es

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma San Luis de Potosí Dr. Manuel Nava No. 8, Col. Zona Universitaria Poniente, San Luis Potosí C.P. 78290, S. L. P., Mexico; A302262@alumnos.uaslp.mx (A.P.-D.); cisnerro@uaslp.mx (R.C.-A.)

\* Correspondence: sergio.zubelzu@upm.es; Tel: +31-910670993

Received: 11 February 2020; Accepted: 13 March 2020; Published: 16 March 2020



**Abstract:** A method for determining the optimal Sustainable Urban Drainage Systems (SUDs) combination at city scale is presented in this paper. A comprehensive set of SUDs categories comprising infrastructures aimed at either detaining and locally reusing or infiltrating precipitation are considered. A volumetric water balance is proposed for modelling hydrological processes in urban catchments. A multi-criteria approach combining a cost function and aims for both recharging aquifers and limiting runoff contribution to water courses is proposed to find the optimal SUDs combination. The water balance was run with each possible SUDs combination and the optimal set of SUDs was found. The method was applied to the Metropolitan Area of San Luis Potosi (Mexico). The optimal solutions in this case clearly promoted surface runoff detention and reuse over porous pavements and green roofs but they were sensitive to the considered costs. The SUD requirements to potential new urban developments for each catchment to comply with the original hydrological aims were also studied. The method requires customizing the cost function and using representative climatic data.

**Keywords:** stormwater management; surface runoff; water reuse; low impact development; sustainable urban drainage systems; volumetric water balance; urban catchment

### 1. Introduction

Sustainable Urban Drainage Systems (SUDs) have gained relevancy as efficient solutions for optimal water management in urban areas. While traditional management seeks to rapidly harvest runoff to be treated and discharged to watercourses, SUDs represent a new paradigm that seeks to handle runoff locally. SUDs encompass different types of facilities such as green roofs, permeable pavements, infiltration trenches, detention areas, rain gardens, etc.

Several initiatives have recently been developed to install SUDs in urban areas [1–4]. Scientific literature has widely focused on this topic [5–7], some studies have addressed the optimal SUD combination at the urban planning stage [8–12], while others have studied possible locations or have proposed multi-objective functions for determining the optimal SUDs location [13–16].

Despite the number of studies addressing SUDs, some unsolved questions remain. First, a detailed definition of the SUD design aim has not been thoroughly discussed by the literature that, in most

cases, does not go beyond simple goals such as minimizing runoff, maximizing aquifer recharge, or minimizing cost functions. From a theoretical point of view, this target has to be considered in close relation to the set of variables involved in the whole hydrological system since SUDs alter several processes involved. For example, runoff detainment reduces surface discharge to watercourses which, although desired above certain levels, undoubtedly limits streamflow which can affect ecological flows. Otherwise, infiltration of stored runoff into vegetated soils through for example infiltration trenches without further consideration of evapotranspiration could lead to water losses by deep percolation.

Similarly, SUDs design criteria have traditionally relied on the same design standards of traditional draining infrastructures. Standards of SUDs design usually seek to mimic the hydrology of the pre-development state [17] setting up limits of peak flow and runoff volume for different storm events. In line with such guidelines, studies aimed at either defining general planning strategies or particular SUDs design, often use specific extreme events for analyzing SUDs behavior. Several authors have discussed the validity of using extreme storm events for SUDs design based on the fact that such facilities are not aimed at collecting runoff with security purposes but for managing runoff [18].

Otherwise, studies aimed at finding the optimal SUDs combination at the planning stage usually chose among a set of enclosed alternatives encompassing a reduced type of SUDs whose set-up was previously defined, (see, for example, [19]). Studies tackling SUDs design comprising all possible combinations, even the absence, of SUDs to deduce the optimal solution are still lacking.

The present paper proposes a method for determining the optimal SUDs combination at a city scale encompassing the complete hydrological system. A comprehensive set of SUDs categories comprising infrastructures aimed at either detainment and locally reusing runoff or infiltrating precipitation is considered. For that purpose, hydrological dynamics are modeled with a water balance. A multi-criteria decision process encompassing both economic and hydrological aims completes the framework.

## 2. Materials and Methods

The state equation for a linear hydrological system (Equation (1)) relates inputs ( $IP$ ), outputs ( $O$ ) and internal system variation ( $S$ ) as time functions:

$$\frac{dS}{dt} = IP(t) - O(t), \quad (1)$$

For the proposed urban hydrological cycle, the soil water content ( $\theta$ ) varies as a result of evapotranspiration ( $ETk$ ), precipitation ( $P$ ), aquifers recharge ( $D$ ) and runoff ( $R$ ).

$$\frac{d\theta}{dt} = P(t) + I(t) - ETk(t) - D(t) - R(t), \quad (2)$$

Three types of SUD categories comprising most of the SUD facilities were considered:

### 1. SUDs aimed at detainment and storing runoff for local reuse

The set of SUDs aimed at detainment and storing runoff are defined in the present model as  $k_i$  rates of runoff detainment at each  $i$  land use, while the remaining portion of  $R$  goes to conventional urban draining infrastructure ( $CUD$ ).

$$R(t) = \sum k_i R_i(t) + CUD(t), \quad (3)$$

The summation in (3) represents the volume of water stored ( $VSUD$ ) for local reuse. The maximum value for the summation in Equation (3) represents the maximum volume of water to be stored which in turn represents the SUDs design parameter ( $VSUD_{MAX}$ ). Storing tanks or ponds for local reuse, infiltration trenches or wells, infiltration cells, rain gardens, etc. can be included within this SUDs category.

## 2. SUDs aimed at easing the direct infiltration of precipitation

Porous pavements, or equivalent facilities, are included in the model by the particular definition of the infiltration properties of each land use. For that purpose,  $k_{pp_i}$  rates representing the portion of the total area occupied by porous pavements were defined for each  $i$  land use, and specific infiltration properties were assigned to these areas.

## 3. Green roofs

Green roofs were incorporated as green areas where runoff directly goes to  $CUD$ , infiltrated water stores within the soil up to saturation level, infiltrated water after the saturation is reached discharges to  $CUD$ , plants consume the soil water at  $ETk$  rate and the potential water deficit is covered with  $I$ . Similarly,  $k_{gr_i}$  rates define the proportions of each land use occupied by green roofs.

Upon this general structure, the water balance (Equation (2)) simulations were run with the following assumptions.

- After an initial soil water content ( $\theta_0$ ) was defined, the subsequent estimation of  $\theta$  allowed determining the daily irrigation requirements by comparison between the estimated  $\theta$  and the triggering irrigation threshold ( $\theta_r$ ). If  $\theta < \theta_r$ , then  $VSUD$ , if any, was used to increase  $\theta$  to  $\theta_{PC}$ . In the event of  $VSUD$  to be insufficient to increase  $\theta$  to  $\theta_{PC}$ , external irrigation ( $I$ ) was provided.
- Daily potential evapotranspiration and precipitation were used to run the model daily. For a data series of several years, the daily average value of a sort of median interval (values within the interval mean  $\pm 1.5 \times$  standard deviation) was used. Therefore, a representative climatic year was selected to run the water balance.
- The incoming water to  $VSUD$  exceeding its storage capacity ( $VSUD_{MAX}$ ) discharged to  $CUD$ .
- The aquifer was recharged ( $D$ ) by the water infiltrated into the vegetated soil after  $\theta$  equals saturation ( $\theta_s$ ) and by the infiltrated water, if any, in paved areas. In green roofs, runoff and excess of infiltrated water when  $\theta$  exceeds saturation level also discharged to  $CUD$ .
- To avoid problems arising with regard to the duration of storm events, and to simplify the incorporation of porous pavements and green roofs to the water balance, the Soil Conservation System curve number method was used to estimate runoff volumes. Each daily precipitation value was supposed to define a unique storm event.

The water balance was computed, for each possible combination of SUDs implemented by  $k_i$ ,  $k_{gr_i}$  and  $k_{pp_i}$ , daily, with daily  $P$  and  $ETk$  (a crop coefficient  $k_{cc} = 1$  was considered to transform  $ET_0$  into  $ETk$ ) data and supposing  $\theta_0$  to be 0.2. The annual aggregated  $D$ ,  $I$  and  $CUD$  were estimated and the following cost function was computed for each SUDs combination. The sets of SUDs minimizing  $CT$  (Aggregated cost) and complying with the constraints were selected.

$$CT = VSUD_{MAX} \times CUVSUD + \sum CUSUD_i \times k_i \times R_i + CUCUD \times CUD + CUI \times I \\ + CU_{pp} \times \sum k_{pp_i} \times S_i + CU_{gr} \times \sum k_{gr_i} \times S_i \\ \text{st:} \\ D \geq D_{min} \\ CUD_{min} \leq CUD \leq CUD_{max},$$

where:

- $VSUD_{MAX}$  represents the runoff storing capacity.
- $CUVSUD$  is the unitary cost ( $\text{€}/\text{m}^3$ ) of the storing elements.
- $CUSUD_i$  is the unitary cost ( $\text{€}/\text{m}^3$ ) of detaining, storing and reusing runoff at each land use.
- $CUCUD$  represents the unitary cost ( $\text{€}/\text{m}^3$ ) of managing runoff through conventional draining facilities.

- $CUI$  is the unitary cost of irrigating ( $\text{€}/\text{m}^3$ ).
- $CUp_p$  is the unitary cost of porous pavements ( $\text{€}/\text{m}^2$ ).
- $CUG_r$  represents the unitary cost of green roofs ( $\text{€}/\text{m}^2$ ).
- $\Sigma k_{pp_i} \times S_i$  and  $\Sigma k_{gr_i} \times S_i$  represent the areas occupied by either porous pavements or green roofs. Two hydrological objectives were added to economic criteria:
- $D \geq D_{min}$ : the aquifer to be recharged above a given limit seeking to either comply with environmental objectives or to replenish water withdrawals.
- $CUD_{min} \leq CUD \leq CUD_{max}$ : supposed that  $CUD$  finally goes to watercourses, this constraint seeks to maintain ecological flows but not exceeding an upper limit to prevent flooding risks. The unknowns of the optimization problem were  $VSUD_{MAX}$  and  $k_{pp_i}$ ,  $k_{gr_i}$ , and  $k_i$  rates.

#### Case Study

The Metropolitan Area of San Luis Potosí is located approximately 400 km north-west of México City at the south-east end of the Sierra Madre Occidental with an area of 2409.2 km<sup>2</sup> (see Figure 1).

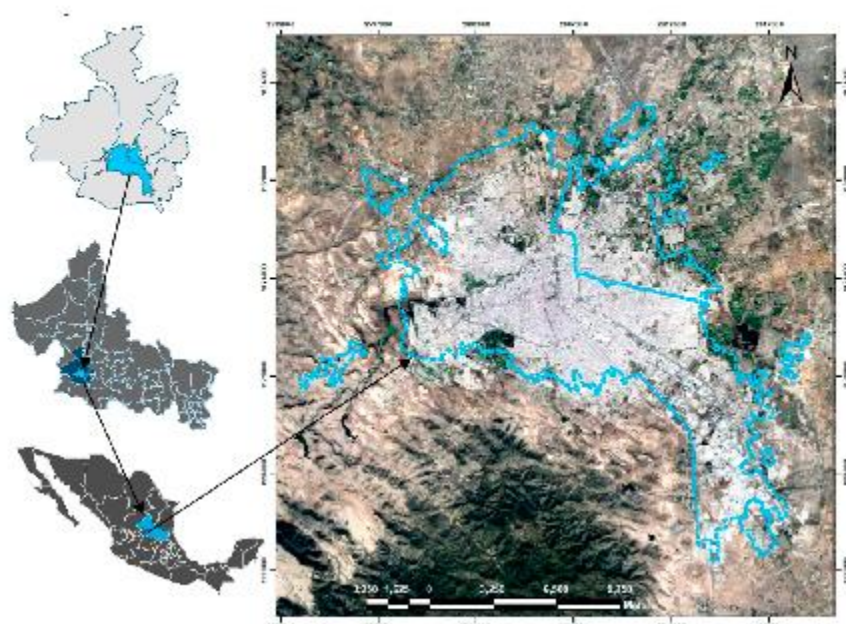


Figure 1. Location of San Luis Potosí.

The region has a semiarid climate with mean temperature, precipitation, and potential evapotranspiration around 17 °C, 400 mm, and 2033 mm, respectively [20]. The valley of San Luis Potosí, located at the hydrological region 37 "El Salado," has no natural perennial surface drainage. The total availability of surface water stored in dams to supply the Metropolitan Area of San Luis Potosí is 10.176 Mm<sup>3</sup> [21]. Yearly average groundwater extraction amounts to approximately 125.6 Mm<sup>3</sup> per year distributed as follows (see Table 1).

**Table 1.** Groundwater extraction (Mm<sup>3</sup>/year).

Uses	Upper Aquifer	Deep Aquifer	Total
Potable urban water	0.167	84.389	84.419
Agriculture	3.64	20.449	24.084
Industrial	0.096	9.650	9.746
Agroindustry	0.157	0.027	0.184
Urban services	0.452	5.198	5.650
Livestock	0.25	0.661	0.911
Other	0.18	3	0.006
Total	4.969	120.609	125.578

The installed capacity of wastewater treatment plants is 1889.4 L/s (Table 2) and the treated flow 1575.89 L/s [22].

**Table 2.** The capacity of facilities for wastewater treatment.

Treatment Plant	Installed Capacity (L/s)	Treated Flow (L/s)
Yangamanga IB	110	110
North - Yangamanga II	400	240
Club de Golf	40	40
Agua tratada del potosi	50	30
Yangamanga IA	40	40
Potosino Sports Club	1.4	1.4
Tanque Tenorio	1050	1000
Deportivo Lomas	100	40
Villa Antigua	11	6
Valle de los Cedros	10	6
Villa Magna	16	2
Frac El Pedregal	20	20
IMMSA	40	40
Loma Prieta	0.76	0.25
El Refugio	0.24	0.24
Total	1889.4	1575.89

Three catchments were delineated in the metropolitan area of San Luis Potosi for analyzing SUDs alternatives. Figure 2 depicts the identified catchments and Table 3 presents the land use areas within each catchment.

**Table 3.** Land use areas (10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>) by catchment.

Catchment	Urban	Urban	Green Zones/Sport Facilities (zzvv)	Rural (ag)	Total
	Intensive (in)	Semi-Intensive (sin)			
Subsector 1 (SZ1)	1406.67	1347.23	690.35	9557.09	13,001.35
Subsector 2 (SZ2)	1231.87	3015.90	1465.49	11,334.31	17,047.58
Subsector 3 (SZ3)	856.29	1305.14	1089.60	3929.98	7181.00

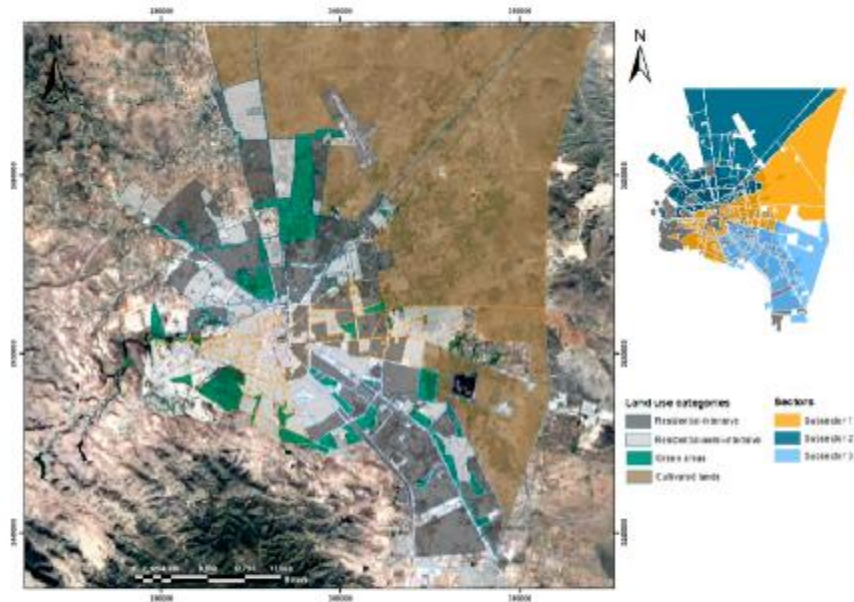


Figure 2. Catchments delineated in the metropolitan area of San Luis Potosí (numbers of axis represent UTM coordinates).

3. Results

Table 4 presents the costs used in the optimization model.

Table 4. Unitary costs for the optimization problem.

Cost	Value
$CUCUD$ (€/m <sup>3</sup> )	1.99
$CUI$ (€/m <sup>3</sup> )	1.68
$CUVSUD$ (€/m <sup>3</sup> )	0.315
$CUSUD_{in}$ (€/m <sup>3</sup> )	0.1
$CUSUD_{sin}$ (€/m <sup>3</sup> )	0.1
$CUSUD_{zsv}$ (€/m <sup>3</sup> )	0.8
$CUSUD_{ag}$ (€/m <sup>3</sup> )	0.9
$CU_{pp}$ (€/m <sup>2</sup> )	25
$CU_{gr}$ (€/m <sup>2</sup> )	25

$CUCUD$ ,  $CUI$ , and  $CUVSUD$  were retrieved from [18];  $CUSUD_{in}$ ,  $CUSUD_{sin}$ ,  $CUSUD_{zsv}$ ,  $CUSUD_{ag}$ ,  $CU_{pp}$ , and  $CU_{gr}$  were defined with the aid of local agents. These costs, in particular the ones for porous pavements and green roofs, agree with the SUDs costs in other studies, for example in [18]. The costs were updated at a hypothetical starting project date and include both building and operation costs. Table 5 presents the Curve Number values ( $CNs$ ) used for runoff estimation.

Table 5. Curve Numbers ( $CNs$ ) of each land use, porous pavement and green roofs.

$CN_{in}$	$CN_{sin}$	$CN_{zsv}$	$CN_{ag}$	$CN_{pp}$	$CN_{gr}$
98	92	90	85	85	85

Tables 6 and 7 present the estimates obtained with Equation (2) for, respectively, the current land use distribution presented in Table 3 and the hypothetical original situation where the entire land would be completely occupied by rural areas.

Table 6. Main water balance variables for the current state.

Catchment	D (m <sup>3</sup> /year)	CUD (m <sup>3</sup> /year)	I (m <sup>3</sup> /year)	CT (€/year)
SZ1	50,497,634.69	3,741,781.23	1,965,519.25	11,409,716.99
SZ2	64,526,169.28	4,607,891.62	4,172,428.50	16,840,884.21
SZ3	25,238,222.93	2,209,662.10	3,102,213.31	10,270,445.96

Table 7. Main water balance variables for the pre-development state.

Catchment	D (m <sup>3</sup> /year)	Surface Runoff to Watercourses (m <sup>3</sup> /year)
SZ1	54,328,896.67	2,356,980.36
SZ2	71,236,927.95	3,090,510.77
SZ3	30,007,351.85	1,301,825.42

For finding the optimal combination of SUDs the cost function was defined as follows.

$$\text{Min } CT = CUD \times CUCUD + I \times CUI + VSUD_{MAX} \times CUSUD + kin \times Rin \times CUSUDin + ksin \times Rsin \times CUSUDsin + kzzvv \times Rzzvv \times CUSUDzzvv + kag \times Rag \times CUSUDag + (kppin \times Sin + kppsin \times Ssin + kppzzvv \times Szzvv) \times CUpp + (kgrin \times Sin + kgrsin \times Ssin) \times CUgr$$

$$\text{st :}$$

$$0 \leq kin, ksin, kzzvv, kag \leq 1$$

$$0 \leq kppin, kppsin, kgrin, kppzzvv, kgrsin \leq 0.3$$

$$100,000 \leq VSUD_{MAX} \leq 4,600,000,$$

Potential areas suitable for porous pavements and green roofs do not reach the total area of each land use ( $kpp_i, kgr_i \leq 0.3$ ) as such facilities can only be installed at certain zones (green roofs at buildings and porous pavements out of buildings and unpaved areas). In addition, it was assumed that only at in and sin land uses green roofs can be installed while only in, sin and zzzvv lands are suitable for porous pavements. On the contrary,  $kin, ksin, kzzvv$ , and  $kag$  were let to vary between zero and one as it was assumed that the runoff detention rate can perfectly vary between zero and one.  $VSUD_{MAX}$  was limited to the maximum runoff appearing if the maximum precipitation (historical data series) falls.

Replenishing water withdrawals was considered for limiting  $D$ . For each catchment,  $D$  was imposed to be larger than the proportional rate (according to the area of each catchment over the total area of San Luis Potosi) of the annual aquifer extractions estimated to be  $1.25 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/year (see Table 1).

The amount of runoff conveyed to  $CUD$  to feed watercourses was imposed to be smaller than the pre-development values (Table 6) and larger than the supposedly original ones (Table 7) to ensure that SUD implementation keeps potential ecological flow rates without increasing the actual flooding risk.

Table 8 summarizes the limits for  $D$  and  $CUD$ .

Table 8. Summary of bounds for  $D$  and  $CUD$  (m<sup>3</sup>).

Variable	SZ1	SZ2	SZ3
$D$	$\geq 42,704,000$	$\geq 56,520,000$	$\geq 23,864,000$
$CUD$	$\geq 2,356,980.36$ $\leq 3,741,781.23$	$\geq 3,090,510.77$ $\leq 4,607,891.62$	$\geq 1,301,825.42$ $\leq 2,209,662.10$

The multi-objective problem was solved to find the combination of  $kin, ksin, kzzvv, kag, kppin, kppsin, kppzzvv, kgrin, kgrsin$ , and  $VSUD_{MAX}$  complying with the proposed restrictions and minimizing

the cost function. All possible combinations of these variables were checked computing the water balance and *CT*, and the optimal values were obtained (Table 9).

Table 9. Optimal combination of SUDs by catchment.

SUD	SZ1	SZ2	SZ3
$k_{ppin}$	0.0	0.0	0.0
$k_{ppsin}$	0.0	0.0	0.0
$k_{ppzvv}$	0.0	0.0	0.0
$k_{grin}$	0.0	0.0	0.0
$k_{grsin}$	0.0	0.0	0.0
$VSUD_{MAX}$ (m <sup>3</sup> )	1,100,000	1,100,000	1,100,000
$k_{zvv}$	0.1	0.0	0.2
$k_{ag}$	0.0	0.0	0.0
$k_{in}$	0.9	1	0.9
$k_{sin}$	0.2	0.4	0.2
<i>CT</i> (€)	6,616,706	11,805,947	7,055,552

From Table 9, it can be observed that green roofs and porous pavements are penalized by their larger cost in comparison with the costs of the facilities aimed at collecting and reusing runoff. Table 10 present the main variables of the water balance for the optimal SUDs combinations.

Table 10. Main variables of water balance for the optimal combination of SUDs.

Catchment	<i>D</i> (m <sup>3</sup> /year)	<i>CUD</i> (m <sup>3</sup> /year)	<i>I</i> (m <sup>3</sup> /year)
SZ1	50,497,634.69	2,357,176.78	853,518.62
SZ2	64,526,169.28	3,115,913.90	3,030,168.29
SZ3	25,238,222.93	1,305,844.86	2,379,628.70

As it could be expected, the optimal SUDs combinations managed to reduce *CUD* to practically reach the pre-development state while *D* largely exceeds the established minimum thresholds. *D* and *CUD* mostly come from rural areas while runoff stored in *VSUD* is almost entirely detained in intensive and semi-intensive land use (Figure 3).

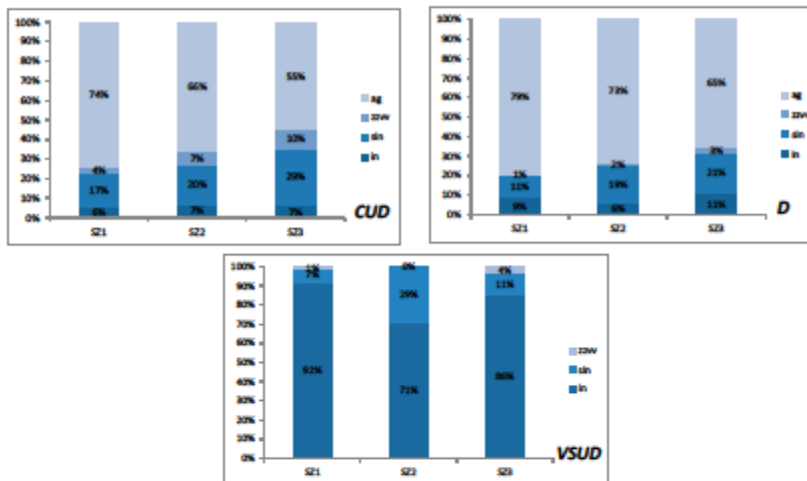


Figure 3. Land uses' contribution to *CUD*, *D*, and the volume of water stored (*VSUD*).

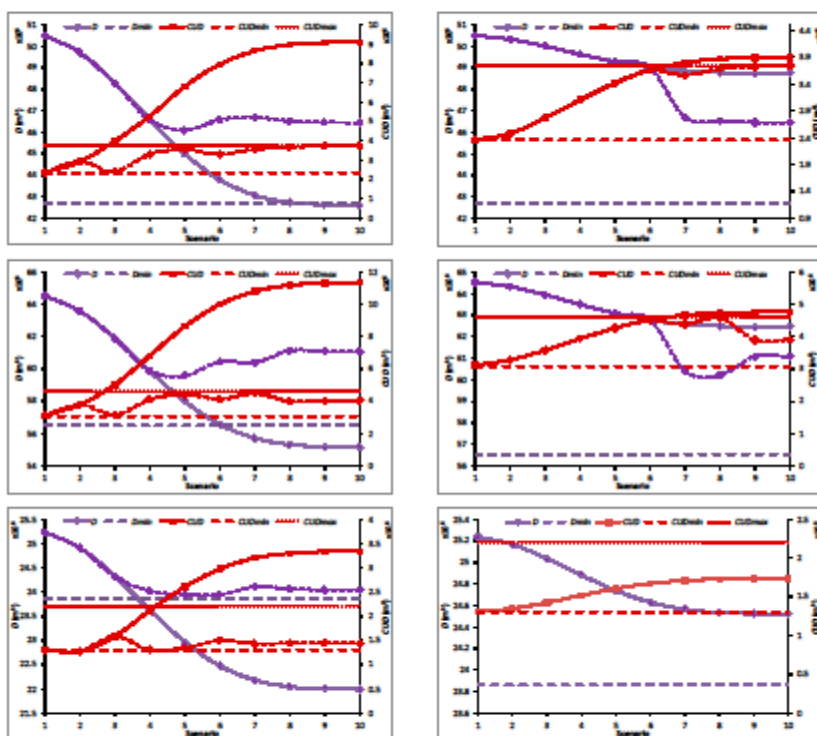


Different scenarios were studied for each catchment (Table 11) either developing residential intensive areas at the expense of rural lands (keeping constant semi-intensive and green zones) or developing semi-intensive areas on rural lands (keeping constant intensive and green zones). The considered scenarios are presented in Table 11.

Figure 4 shows  $D$  and  $CUD$  calculated for each scenario together with their proposed thresholds ( $D_{min}$ ,  $CUD_{min}$ ,  $CUD_{max}$ ).

**Table 11.** Scenarios for analyzing the sensitivity of optimal SUDs combinations. Areas of land use by catchments ( $10^6$  m<sup>2</sup>).

Catchment/Land Use	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SZ1	Intensive	14.07	23.62	40.83	61.47	80.74	95.19	103.86	107.90	109.29	109.60
	Rural	95.57	86.01	68.81	48.17	28.90	14.45	5.78	1.73	0.35	0.03
SZ2	Intensive	12.32	23.65	44.05	68.54	91.39	108.52	118.81	123.61	125.25	125.62
	Rural	113.34	102.01	81.61	57.12	34.27	17.14	6.85	2.06	0.41	0.04
SZ3	Intensive	8.56	12.49	19.57	28.06	35.98	41.92	45.49	47.15	47.72	47.85
	Rural	39.30	35.37	28.30	19.81	11.88	5.94	2.38	0.71	0.14	0.01
SZ1	Semi-intensive	13.47	23.03	40.23	60.88	80.14	94.59	103.26	107.31	108.70	109.01
	Rural	95.57	86.01	68.81	48.17	28.90	14.45	5.78	1.73	0.35	0.03
SZ2	Semi-intensive	30.16	41.49	61.90	86.38	109.23	126.36	136.65	141.45	143.09	143.46
	Rural	113.34	102.01	81.61	57.12	34.27	17.14	6.85	2.06	0.41	0.04
SZ3	Semi-intensive	13.05	16.98	24.06	32.54	40.47	46.41	49.97	51.64	52.21	52.34
	Rural	39.30	35.37	28.30	19.81	11.88	5.94	2.38	0.71	0.14	0.01



**Figure 4.**  $D$  and  $CUD$  results and proposed thresholds for each catchment (SZ1 first row, SZ2 s and SZ3 third), letting either intensive (left column) or semi-intensive (right column) uses to grow.

Continuous lines displayed in Figure 4 represent  $D$  and  $CUD$  for the optimal SUDs combinations (Table 3). Developing semi-intensive urban areas at the expense of rural lands does not imply failing in the proposed objectives except in SZ1 and SZ2 where  $CUD$  exceeds the upper limit for developments larger than those considered in scenarios 2 and 6, respectively. On the contrary, intensive developments more frequently break the objectives:  $CUD$  above scenario 2 and  $D$  above scenario 9 in SZ1;  $CUD$  above scenario 2 and  $D$  above scenario 7; SZ2 and  $CUD$  above scenario 4 and  $D$  above scenario 3 in SZ3.

Dashed lines presented in Figure 4 display  $D$  and  $CUD$  for the new optimal (cheapest) combination of either  $k_{grin}$ ,  $k_{ppin}$ , and  $k_{in}$  (intensive developments) or  $k_{grsin}$ ,  $k_{ppsin}$ , and  $k_{sin}$  (semi-intensive developments) required for the developments for the entire catchment to comply with the original constraints. That is, each new urban development altering the water balance to fail in meeting the objectives for  $D$  and/or  $CUD$ , shall be required to provide a SUD combination such that the whole catchment complies with the original targets. Table 12 presents the new optimal (minimum cost) SUDs combination required for the new developments for the catchment to meet the original objectives.

Table 12. Optimal combination of  $k_{ppin}$ ,  $k_{grin}$ ,  $k_{in}$ ,  $k_{ppsin}$ ,  $k_{grsin}$ , and  $k_{sin}$  for new developments.

Catchment	Scenario	$k_{ppin}$	$k_{grin}$	$k_{in}$	$k_{ppsin}$	$k_{grsin}$	$k_{sin}$
SZ1	3	0	0	0.8			
	4	0	0	0.9			
	5	0.2	0	0.9			
	6	0	0	0.9			
	7	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0
	8	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0
	9	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0
SZ2	10	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0
	3	0	0	0.9			
	4	0	0	0.9			
	5	0.1	0.1	0.9			
	6	0.2	0.2	0.9			
	7	0.1	0.3	0.9	0.1	0.3	0
	8	0.2	0.3	0.9	0.1	0.3	0
SZ3	9	0.2	0.3	0.9	0.2	0.3	0
	10	0.2	0.3	0.9	0.2	0.3	0
	4	0.1	0.1	0.8			
	5	0	0.3	0.8			
	6	0.1	0.3	0.7			
	7	0.2	0.3	0.7			

Urban developments are mainly required to detain and reuse runoff and, when necessary, porous pavements and green roofs are also required to preserve the limits for  $D$  and  $CUD$ .

Figure 5 presents the expected evolution of the main water balance variables throughout the representative year using daily climatological data,  $\theta_0 = 0.2$  and  $VSUD_{MAX} = 0$  at  $t = 0$ .

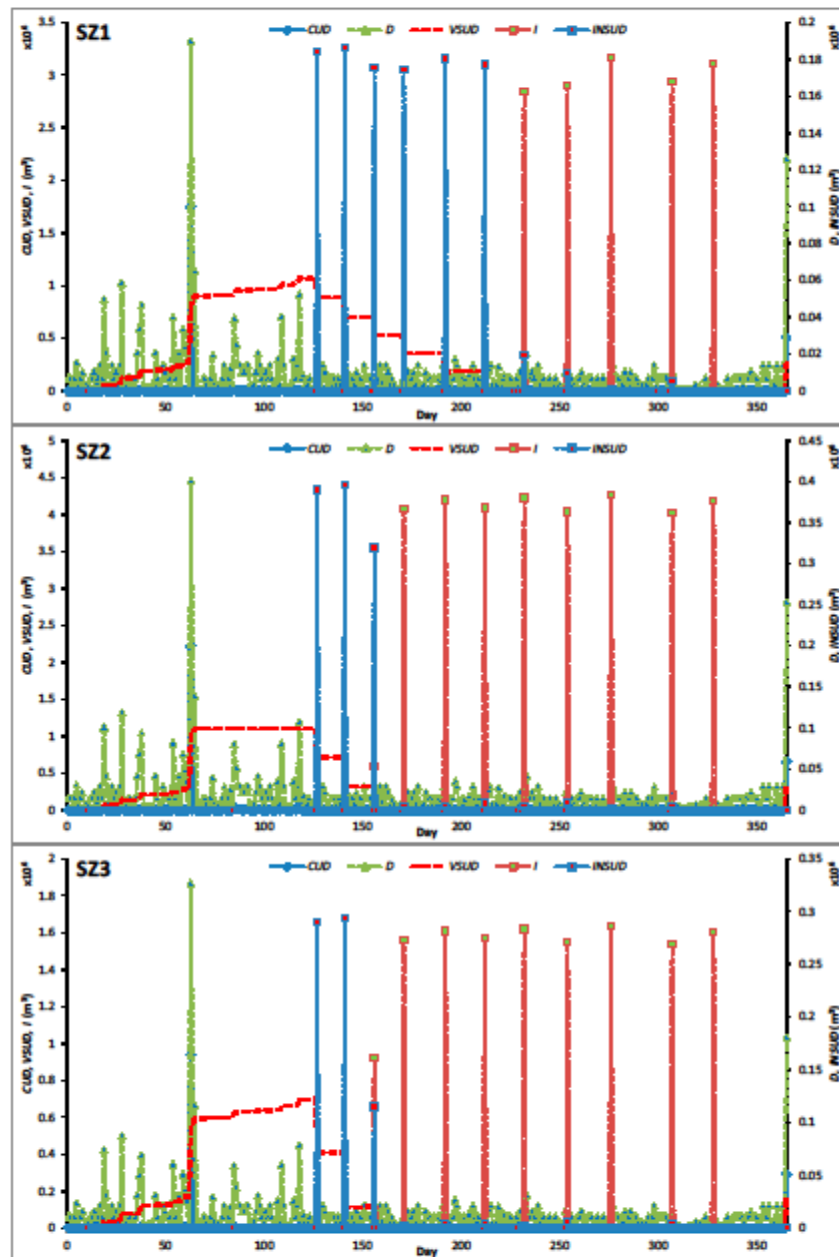


Figure 5. CUD, D, VSUD, I, and INSUD (irrigation from water stored at SUDs) evolution during the year for the three analyzed catchments (SZ1, SZ2, SZ3).

Similar patterns were observed in the three analyzed catchments:  $VSUD$  is filling during the initial part of the year, supplying water to fulfill the irrigation requirements of three irrigation events ( $INSUD$ ) at SZ2 and SZ3 and six at SZ1.  $VSUD_{MAX}$  almost empties after days 210 (SZ1), 150 (SZ2) and 160 (SZ3), from which irrigation is mostly provided by external sources.

Figure 6 presents the operation of the SUDs storing elements and  $CUD$  for a 1.1 h duration storm event of either 5 or 100 years return period and for the optimal SUDs combinations. The expected evolution of  $CUD$  in the pre-development (actual) and the runoff discharge to watercourses in the supposedly original (only rural areas) states have also been depicted in Figure 6.

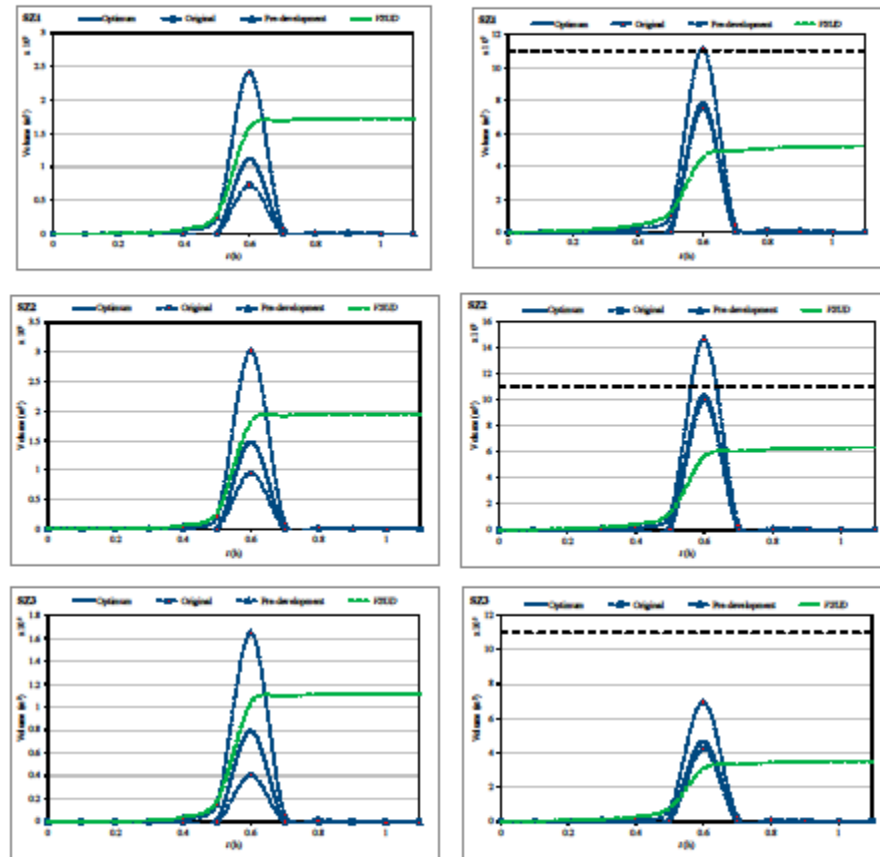
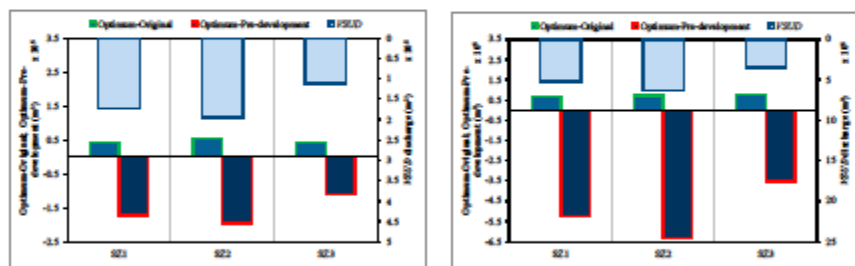


Figure 6.  $CUD$  and  $VSUD$  level for 5 (left column) and 100 (right column) years return period, 1.1 h duration, storm events.

The presence of SUDs helps reduce the peak flow at any catchment and return period compared to the actual (pre-development) situation.  $VSUD_{MAX}$  does not fill in any case. The peak flow observed with the optimal SUDs combination is not delayed with respect to the original or pre-development cases because runoff is not completely collected and thus it is continuously discharging to  $CUD$ . Figure 7 presents the  $CUD$  increase, or reduction, for the analyzed storm events as a result of the SUDs implementation and the stored volume at  $VSUD$  during the studied events as well.



**Figure 7.** The difference of discharged volume to CUD between optimal SUDs combination and either the original or the predevelopment situation for a 5 (left) or 100 (right) return period storm events.

From Figure 7, it can also be observed that the proposed optimal solutions help mimic the original situation with regards to the discharged volume so the traditional requirements for SUD design (see, for example, [18]) would be met.

#### 4. Discussion

We have addressed the study of the optimal SUDs combination to comply with both economic and hydrological goals. For this purpose, we have developed a Python code instead of using other models as SWMM [23,24]. It provided us with greater flexibility to perform specific studies such as the requirements for new developments to ensure the initial hydrological objectives are met. Although the Metropolitan Area of San Luis Potosi does not have a monitoring network for calibration and validation of the results, the estimates agree with the information of the treatment plants which could be considered an indirect validation of the model performance. Ideally, validation processes are needed to ensure the suitability of the assumptions and they must be incorporated if available.

We focused on the optimal SUDs provision from an open insight without more limitations than those related to costs, aquifer recharge, and contribution to watercourses. This approach seeks to provide the best SUDs combination aimed at mimicking the pre-development status. Other authors have focused on either finding the best SUDs combination among the enclosed set of SUD combinations [24,25] or determining the optimal SUDs location [26]. In this paper, we are not delivering guidelines on where to locate SUDs facilities or proposing enclosed SUDs packages. We focus on the entire urban catchment and define the optimal solution in terms of minimum cost, required aquifer recharge, and watercourses contribution.

We considered three groups of SUDs comprising the majority of SUDs facilities aimed at either detaining and locally reusing runoff or increasing infiltration rates. Other particular SUD facilities could also be incorporated by properly defining their effect on each variable of the water balance. The method yielded the optimal SUDs combination for the catchment by comparing the results of each potential SUD combination with both the actual status and the supposedly original configuration before the urban area was developed. It allowed us to propose general criteria to be met by any other future urban development within the catchment to preserve the original targets. As a result of it, the optimal SUDs combination required for any potential urban development for ensuring that the entire catchment meets the original criteria was estimated.

The solution is sensitive to costs and the resulting optimal SUDs combinations presented in this paper are only valid for the Metropolitan Area of San Luis Potosi. The particular costs, even the set of costs, considered in this work might not be completely suitable for other regions. The issues of the cost function have to be carefully analyzed for each case-study and their temporal consistency must be ensured. The theoretical framework, based on a multi-criteria approach encompassing both economic and hydrological goals, is, however, valid for any other location.

It can be assumed that, on average, the deduced optimal SUDs rates ( $k_i$ ,  $kgr_i$ , and  $kpp_i$ ) generate the estimated  $I$ ,  $CUD$ , and  $D$  values as we used representative climatic data. However, the real  $I$ ,  $CUD$ , and  $D$  volumes with the optimal SUD combinations strongly depend on climatic variables. Occasionally, real values could deviate from estimates as average climatic data were used to deduce the optimal combinations. However, the aggregated results should not differ from the estimates provided that the average values were calculated using data representative of local weather conditions. In this paper, we use the average value of the median interval as we assumed that this metric better represented the nature of the data series. Any other method of providing representative values should be valid.

Other authors have also presented different multi-objective [27] or multi-criteria [13,24] routines but to the author's best knowledge none of them come up with comprehensive constraints comparable to those considered in the present paper. Most of the previous studies pose simple minimization criteria for costs or flooding, for example. On the contrary, we incorporate criteria/objectives aimed at minimizing costs and mimicking the pre-development status. It implies defining an upper limit for flooding to prevent damages, a lower limit also for flooding (or more to the point for watercourses discharge) to ensure ecological river levels and finally a minimum aquifer recharge to cover extraction rates.

The approach presented in this paper differs from those considered in various standards for example [17] that only define thresholds of peak flow and volume for particular storm events. The methodology developed in this paper does not focus on storm events but the daily evolution of the selected variables. Despite the different design approaches, the deduced optimal solutions were also checked to comply with the proposed goals for two storm events yielding satisfactory results.

## 5. Conclusions

A multi-objective decision model comprising economic and hydrological criteria is proposed to estimate the optimal SUDs combination at the urban catchment scale. Economic criteria were incorporated by a cost function encompassing costs of SUDs installation and operation. Hydrological criteria consisted of thresholds for ensuring a minimum groundwater recharge rate and both upper and lower limits for runoff to prevent flooding damages and ensure a minimum runoff contribution to watercourses. A conceptual method based on a volumetric water balance was performed to estimate the daily evolution of hydrological processes.

The method is based on urban catchments and yields the optimal SUD combination considering detention and local reuse facilities (infiltration facilities, rain gardens, or similar), green roofs, and porous pavements. The method, and the theoretical general framework, were probed for validity to find the optimal SUD combination in three urban catchments at the Metropolitan Area of San Luis Potosi (México). In this case, the optimal solutions promoted surface runoff detention and reuse over porous pavements and green roofs.

Some key points to be customized for each application have to be carefully considered, in particular: identifying representative statistics for incorporating climatic information and defining the proper set of representative costs ensuring their temporal consistency. The requirements for future urban developments for the entire catchment to keep accomplishing the original hydrological targets were estimated. It allows incorporating comprehensive SUD planning criteria for the sustainability of urban catchments to be preserved by new potential developments.

It must be remarked that the real operation of the SUD facilities could differ from the model estimates as average climatological data were used. Despite this, SUD operating conditions during particular storm events were checked and the results showed their suitability to practically mimic the pre-development status for both 5 and 100 years return period and 1.1 h duration storm events.

**Author Contributions:** Conceptualization, R.C.-A., S.Z., and A.P.-D.; methodology, S.Z.; software, S.Z.; validation, S.Z. and A.D.-P.; formal analysis, A.S.-W. and L.R.-S.; writing—original draft preparation, S.Z.; writing—review and editing, A.S.-W. and L.R.-S.; visualization, A.S.-W. and L.R.-S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Abbreviations

Symbol	Meaning
SUD	Sustainable Urban Drainage System
$S$	Theoretical internal variation of a system
$IP$	Theoretical inputs of a system
$O$	Theoretical outputs of a system
$\theta$	Soil water content (dimensionless)
$t$	Time (T)
$P$	Precipitation [ $L^3$ ]
$I$	Irrigation [ $L^3$ ]
$ET_k$	Crop evapotranspiration [ $L^3$ ]
$D$	Deep percolation [ $L^3$ ]
$R$	Runoff [ $L^3$ ]
$k_i$	Rate of runoff detention at the land use $i$ (dimensionless)
$CUD$	Volume discharged to conventional urban drainage systems [ $L^3$ ]
$VSUD$	Volume of runoff stored at SUDs aimed at storing and reusing runoff [ $L^3$ ]
$VSUD_{MAX}$	Maximum storing capacity of SUDs aimed at storing and reusing runoff [ $L^3$ ]
$k_{pp_i}$	Rate of porous pavement at land use $i$ (dimensionless)
$k_{gr_i}$	Rate of green roofs at land use $i$ (dimensionless)
$ET_0$	Potential evapotranspiration [ $L^3$ ]
$k_{cc}$	Crop coefficient (dimensionless)
$CT$	Aggregated cost (€)
$CU$	Unitary cost (either €/m <sup>3</sup> or €/m <sup>2</sup> )
$in$	Intensive residential land use
$sin$	Semi-intensive residential land use
$zzvv$	Green zones/sport facilities
$ag$	Rural land use
$CN$	Curve Number coefficient (dimensionless)
$SZ$	Catchment/Subzone
$INSUD$	Irrigation from water stored at SUDs [ $L^3$ ]

## References

1. Binesh, N.; Niksokhan, M.H.; Sarang, A.; Rauch, W. Improving sustainability of urban drainage systems for climate change adaptation using best management practices: A case study of Tehran, Iran. *Hydrol. Sci. J.* **2019**, *64*, 381–404. [[CrossRef](#)]
2. Perales-Momparler, S.; Andrés-Doménech, I.; Hernández-Crespo, C.; Vallés-Morán, F.; Martín, M.; Escuder-Bueno, I.; Andreu, J. The role of monitoring sustainable drainage systems for promoting transition towards regenerative urban built environments: A case study in the Valencian region, Spain. *J. Clean. Prod.* **2017**, *163*, S113–S124. [[CrossRef](#)]
3. Rodríguez-Sinobas, L.; Zubelzu, S.; Perales-Momparler, S.; Canogar, S. Techniques and criteria for sustainable urban stormwater management. The case study of Valdebebas (Madrid, Spain). *J. Clean. Prod.* **2018**, *172*, 402–416. [[CrossRef](#)]
4. Pappalardo, V.; La Rosa, D.; Campisano, A.; La Greca, F. The potential of green infrastructure application in urban runoff control for land use planning: A preliminary evaluation from a southern Italy case study. *Ecosyst. Serv.* **2017**, *26*, 345–354. [[CrossRef](#)]
5. Dietz, M.E. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water Air Soil Pollut.* **2007**, *186*, 351–363. [[CrossRef](#)]

6. Fletcher, T.D.; Shuster, W.; Hunt, W.F.; Ashley, R.; Butler, D.; Arthur, S.; Trowsdale, S.; Barraud, S.; Semadeni-Davies, A.; Bertrand-Krajewski, J.L.; et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water J.* **2015**, *12*, 525–542. [[CrossRef](#)]
7. Elliott, A.H.; Trowsdale, S.A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environ. Model. Softw.* **2006**, *22*, 394–405. [[CrossRef](#)]
8. Li, Z.; Dong, M.; Wong, T.; Wang, J.; Kumar, A.; Singh, R. Objectives and Indexes for Implementation of Sponge Cities—A Case Study of Changzhou City, China. *Water* **2018**, *10*, 623. [[CrossRef](#)]
9. Li, H.; Ding, L.; Ren, M.; Li, C.; Wang, H. Sponge city construction in China: A survey of the challenges and opportunities. *Water* **2017**, *9*, 594. [[CrossRef](#)]
10. Meng, M.; Dąbrowski, M.; Tai, Y.; Stead, D.; Chan, F. Collaborative spatial planning in the face of flood risk in delta cities: A policy framing perspective. *Environ. Sci. Policy* **2019**, *2019*, 96, 95–104. [[CrossRef](#)]
11. Xu, Y.; Jia, H.; Wang, Z.; Mao, X.; Xu, C. SWMM-based methodology for block-scale LID-BMPs planning based on site-scale multi-objective optimization: A case study in Tianjin. *Front. Environ. Sci. Eng.* **2017**, *11*, 1. [[CrossRef](#)]
12. Chang, N.B.; Lu, J.W.; Chui, Y.F.M.; Hartshorn, N. Global policy analysis of low impact development for stormwater management in urban regions. *Land Use Policy* **2018**, *70*, 368–383. [[CrossRef](#)]
13. Wang, M.; Sweetapple, C.; Fu, G.; Farmani, R.; Butler, D. A framework to support decision making in the selection of sustainable drainage system design alternatives. *J. Environ. Manag.* **2017**, *201*, 145–152. [[CrossRef](#)]
14. Raei, E.; Alizadeh, M.R.; Nikoo, M.R.; Adamowski, J. Multi-objective decision-making for green infrastructure planning (LID-BMPs) in urban storm water management under uncertainty. *J. Hydrol.* **2019**, *579*, 124091. [[CrossRef](#)]
15. Xu, Y.; Engel, B.A.; Shi, X.; Leng, L.; Jia, H.; Shaw, L.Y.; Liu, Y. Marginal-cost-based greedy strategy (MCGS): Fast and reliable optimization of low impact development (LID) layout. *Sci. Total Environ.* **2018**, *640*, 570–580. [[CrossRef](#)]
16. Giacomoni, M.H.; Joseph, J. Multi-objective evolutionary optimization and Monte Carlo simulation for placement of low impact development in the catchment scale. *J. Water Resour. Plan. Manag.* **2018**, *143*, 04017053. [[CrossRef](#)]
17. Ballard, B.W.; Wilson, S.; Udale-Clarke, H.; Illman, S.; Scott, T.; Ashley, R.; Kellaguer, R. *The SuDS Manual. Construction Industry Research and Information Association; Department for Environment, Food & Rural Affairs* London, UK, 2015.
18. Zubelzu, S.; Rodríguez-Sinobas, L.; Andrés-Domenech, I.; Castillo-Rodríguez, J.T.; Perales-Momparler, S. Design of water reuse storage facilities in Sustainable Urban Drainage Systems from a volumetric water balance perspective. *Sci. Total Environ.* **2019**, *663*, 133–143. [[CrossRef](#)]
19. Bai, Y.; Li, Y.; Zhang, R.; Zhao, N.; Zeng, X. Comprehensive Performance Evaluation System Based on Environmental and Economic Benefits for Optimal Allocation of LID Facilities. *Water* **2019**, *11*, 341. [[CrossRef](#)]
20. CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México 2018*; Comisión Nacional del Agua: Ciudad de México, México, 2018.
21. CONAGUA. *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero San Luis Potosí (2411), Estado de San Luis Potosí*; Comisión Nacional del Agua: Ciudad de México, México, 2018.
22. INTERAPAS. *Informe Anual 2018*; INTERAPAS: San Luis Potosí, México, 2018.
23. Mei, C.; Liu, J.; Wang, H.; Yang, Z.; Ding, X.; Shao, W. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed. *Sci. Total Environ.* **2018**, *639*, 1394–1407. [[CrossRef](#)]
24. Her, Y.; Jeong, J.; Arnold, J.; Gosselink, L.; Glick, R.; Jaber, F. A new framework for modeling decentralized low impact developments using Soil and Water Assessment Tool. *Environ. Model. Softw.* **2018**, *96*, 305–322. [[CrossRef](#)]
25. Palla, A.; Gnecco, I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *J. Hydrol.* **2015**, *528*, 361–368. [[CrossRef](#)]



26. Martin-Mikle, C.J.; de Beurs, K.M.; Julian, J.P.; Mayer, P.M. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. *Landscape Urban Plan.* **2015**, *140*, 29–41. [[CrossRef](#)]
27. Duan, H.F.; Li, F.; Yan, H. Multi-objective optimal design of detention tanks in the urban stormwater drainage system: LID implementation and analysis. *Water Resour. Manag.* **2016**, *30*, 4635–4648. [[CrossRef](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).