

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 30-09-2024	Fecha C
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO	Pág. 1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Valentina Carrascal Castro Jose Andrés Barbosa Conde		
FACULTAD	Ingeniería		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	Ray Carlos Ramírez Rincón		
CODIRECTOR (si aplica)	No aplica		
TÍTULO DE LA TESIS	Ciudades esponja: Soluciones urbanas sostenibles para la gestión de aguas pluviales.		
TITULO EN INGLES	Sponge cities: sustainable urban solutions for stormwater management		
RESUMEN (70 palabras)			
Esta monografía de grado abarca el concepto de ciudad esponja como solución urbana sostenible, considerando factores como sus estructuras resilientes, la normatividad aplicable a los sistemas urbanos de drenaje sostenible y los casos de estudio más relevantes; además, se exponen las perspectivas futuras de implementación y los obstáculos significativos que afrontan, destacando su capacidad para mitigar los efectos del cambio climático y gestionar adecuadamente el agua pluvial en las ciudades.			
RESUMEN EN INGLES			
This undergraduate monograph covers the concept of the sponge city as a sustainable urban solution, considering factors such as its resilient structures, the regulations applicable to sustainable urban drainage systems, and the most relevant case studies; it also presents future implementation prospects and the significant obstacles it faces, highlighting its capacity to mitigate the effects of climate change and adequately manage stormwater in cities.			
PALABRAS CLAVES	Gestión hídrica, cambio climático, desarrollo, sostenibilidad, resiliencia.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Water management, climate change, development, sustainability, resilience.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 133	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 30	CD-ROM:



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88
atencionalciudadano@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

**Ciudades esponja: Soluciones urbanas sostenibles para la gestión de aguas
pluviales**

José Andrés Barbosa Conde

Valentina Carrascal Castro

Facultad de Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Mgtr. Ray Carlos Ramírez Rincón

12 Mayo del 2025

Página de Aceptación de la Monografía

Esta monografía fue aceptada por parte de Comité Curricular y evaluada por los jurados asignados, Mgtr. Susana María Plata Jimenez y Esp. Jonathan Becerra Carrascal, a los seis (6) días del mes de mayo del año 2025, en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander.

Índice

Resumen.....	9
Capítulo 1: Análisis Bibliométrico y estado del arte.....	13
1.1 Revisión del Material Bibliográfico.	13
1.2 Estado del arte	23
Capítulo 2: Estructuras sostenibles utilizadas para la ejecución de las ciudades esponja.....	31
2.1 Zanjas de pasto	32
2.2 Trincheras.....	33
2.3 Jardines de biorretención.....	33
2.4 Sistemas geo celulares o modulares	34
2.5 Filtros de arena.....	35
2.6 Estanques de infiltración	36
2.7 Estanques de detención	37
2.8 Humedales artificiales	38
2.9 Techos verdes.....	39
2.10 Pavimentos permeables	41
2.11 Alcorques inundables	42
2.12 Pozo de infiltración	43
2.13 Drenaje Francés.....	45

2.14 Muros vegetales	4
2.14 Muros vegetales	47
Capítulo 3: Normativa de los Sistemas de Drenaje Urbanos Sostenibles a Nivel Mundial.....	57
3.1 China	57
3.2 Australia	59
3.3 Reino Unido	60
3.4 España	61
3.5 Países Bajos.....	62
3.6 Alemania	63
3.7 Francia.....	64
3.8 Estados Unidos.....	64
3.9 Canadá.....	66
3.10 San Salvador.....	66
3.11 Chile	67
3.12 Brasil	67
3.13 Colombia	68
Capítulo 4: Ciudades esponja alrededor del mundo	77
4.1 China	79
4.1.1 Zhengzhou.....	79
4.1.2 Pingxiang.....	82
4.1.3 Beijing.....	84

	5
4.1.4 Fengxi.....	86
4.1.5 Xi'an.....	89
4.2 Dinamarca, Copenhague	91
4.3 Australia, Melbourne.....	93
4.4 Alemania, Berlín	95
4.5 Estados Unidos, New York	97
Capítulo 5: Expectativas futuras y obstáculos.....	107
Capítulo 6. Conclusiones.....	114
Capítulo 7. Recomendaciones	116
Referencias	118

Listado de figuras

Figura 1 Tipos de documentos científicos	13
Figura 2 Crecimiento de la cantidad de fuentes por año	14
Figura 3 Fuentes más relevantes.....	15
Figura 4 Diagrama de principales palabras clave WordCloud	16
Figura 5 Frecuencia de las palabras clave	17
Figura 6 Instituciones más relevantes.....	18
Figura 7 Citaciones por País.....	20
Figura 8 Colaboraciones entre países	21
Figura 9 Contribución de los autores a lo largo de los años.....	22
Figura 10 Documentos más citados.....	23
Figura 11 Franja de pasto y trinchera	32
Figura 12 Trincheras.....	33
Figura 13 Área de biorretención.....	34
Figura 14 Módulos plásticos	35
Figura 15 Filtro de arena	35
Figura 16 Estanque de Infiltración	36
Figura 17 Cuenca de detención	37
Figura 18 Humedal artificial.....	39
Figura 19 Techos verdes.....	40
Figura 20 Pavimento permeable	41
Figura 21 Alcorque inundable	43

Figura 22 Pozo de infiltración	44
Figura 23 Drenaje francés	46
Figura 24 Muros vegetales	47
Figura 25 Guía CJJ/T 245-2016	58
Figura 26 Manual de Drenaje Urbano Sostenible de Melbourne Water	59
Figura 27 EPA Stormwater Management Guidelines	65
Figura 28 Localización de los sistemas aplicados en Fengxi	87
Figura 29 Características de los SUDS en Melbourne	94
Figura 30 Ejemplo de un alcorque inundable	99

Listado de tablas

Tabla 1 Estructuras sostenibles de una ciudad esponja	50
Tabla 2 Normativa de SUDS por país	71
Tabla 3 Análisis comparativo de la aplicación de ciudad esponja	101

Resumen

La gestión del agua se ha visto afectada por una serie de fenómenos climáticos adversos producidos por las precipitaciones desiguales y variabilidad climática, provocando inundaciones en las ciudades, contaminación y escasez del recurso hídrico, lo que demuestra la ineficiente infraestructura del sistema de drenaje convencional. Por estos motivos se ha contemplado considerar alternativas que den solución a estas alteraciones del ciclo hidrológico, surgiendo como respuesta los proyectos mediante el modelo de ciudad esponja, basados en un diseño urbano ecológico mediante un enfoque sostenible de Infraestructura Verde (IG).

En primer lugar, el capítulo uno presenta un análisis bibliométrico en el que se examina la producción científica respecto al tema, identificando los países líderes a partir de una revisión de la literatura. Además de esto, incluye un estado del arte donde se abarca la necesidad de la implementación de este concepto y los impactos generados posteriormente.

En segundo lugar, se describen las estructuras sostenibles que constituyen el sistema de ciudades esponja, como parte del capítulo dos, se resaltan los componentes clave de cada estructura, su funcionalidad y aporte, destacando su contribución en la captura y filtrado del agua. Esto da claridad del área de estudio e incentiva a conocer más a fondo acerca de esta iniciativa.

En el capítulo tres, se encuentran las regulaciones que presentan diferentes países en relación con los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS), destacando su trascendencia en

el manejo integral de las aguas en el ámbito urbano. Se analizan los marcos normativos de países como China, Alemania, Australia y Estados Unidos, siendo los pioneros de estos enfoques sostenibles.

Posteriormente, el capítulo cuatro resalta los proyectos realizados alrededor del mundo mediante el modelo de ciudad esponja, considerando las causas que impulsaron esta adopción, además de evidenciar los tipos de soluciones sostenibles dadas y los beneficios obtenidos en base a ellas. Se resaltan las diferencias en aspectos climáticos y de planificación urbana, tomando de ejemplo casos específicos como Pingxiang en China y Copenhague en Dinamarca, donde se aplicó esta estrategia a gran escala.

Finalmente, en el capítulo cinco, se precisan las expectativas a largo plazo que buscan mejorar y optimizar este tipo de proyectos que traerían múltiples beneficios si se aplica de forma eficaz. De la misma manera, se plantean las limitaciones que ha tenido la puesta en marcha del enfoque de una manera más amplia y se definen en diferentes ámbitos como el normativo, ambiental, económico y social.

Introducción

Los efectos producidos por el cambio climático, han provocado períodos de sequía, interrumpidos por lluvias torrenciales, potenciando la frecuencia e intensidad de situaciones adversas. En este sentido, la creciente urbanización en las ciudades causa la rápida expansión de superficies impermeables, alterando a gran escala el balance hidrológico actual, originando problemas como contaminación del agua, y escasez de la misma, dadas las inundaciones que son cada vez más recurrentes.

Considerando lo anterior, con la finalidad de mejorar la permeabilidad, captación y aprovechamiento hídrico, emerge la propuesta integral de Ciudades Esponja, permitiendo disminuir el grado de escorrentía, favoreciendo la depuración del agua y mejorando la adaptabilidad urbana. Esto a partir de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS), que buscan imitar las funciones de la naturaleza, como es el caso de los humedales artificiales, techos verdes, sistemas de biorretención y estanques de detención e infiltración.

De este modo, distintos países han avanzado en la adopción del modelo que ha generado beneficios significativos en estos lugares del mundo, mientras otros comienzan a replicar sus estrategias. No obstante, todavía existen ciertas limitantes en su desarrollo a gran escala, empezando por la carencia de una regulación estandarizada, seguida de un financiamiento insuficiente.

Esta monografía pretende analizar a detalle el concepto de Ciudad Esponja a nivel global, como solución a la problemática relacionada con la gestión hídrica, con el objetivo de dar a conocer los aspectos clave que hacen parte de este enfoque de planificación urbana, fomentando su comprensión. Esto brinda una perspectiva completa acerca de su factibilidad e incidencia en la sostenibilidad, buscando contribuir al desarrollo de metodologías en pro de la administración y adecuada regulación del agua pluvial.

Capítulo 1: Análisis Bibliométrico y estado del arte

1.1 Revisión del Material Bibliográfico.

En el marco del análisis investigativo, se dispuso de la base de datos Scopus que se encuentra habilitada en la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander - Ocaña. Se digitó la secuencia textual como búsqueda: “Sponge AND city”. Se obtuvo un total de 1550 contribuciones científicas en las que se destacan los artículos de investigación, además de diversos tipos de documentos como, ponencias de conferencias, revistas, capítulos de libros y revisiones, así como se presenta en la siguiente gráfica.

Figura 1

Tipos de documentos científicos

☐ Artículo	1.115
☐ Ponencia de conferencia	244
☐ Revisar	87
☐ Capítulo de libro	51
☐ Reseña de la conferencia	23
☐ Nota	7
☐ Libro	7
☐ Errata	6
☐ Editorial	5
☐ Retraído	4
☐ Carta	1

Nota. Obtenido de Scopus 2025

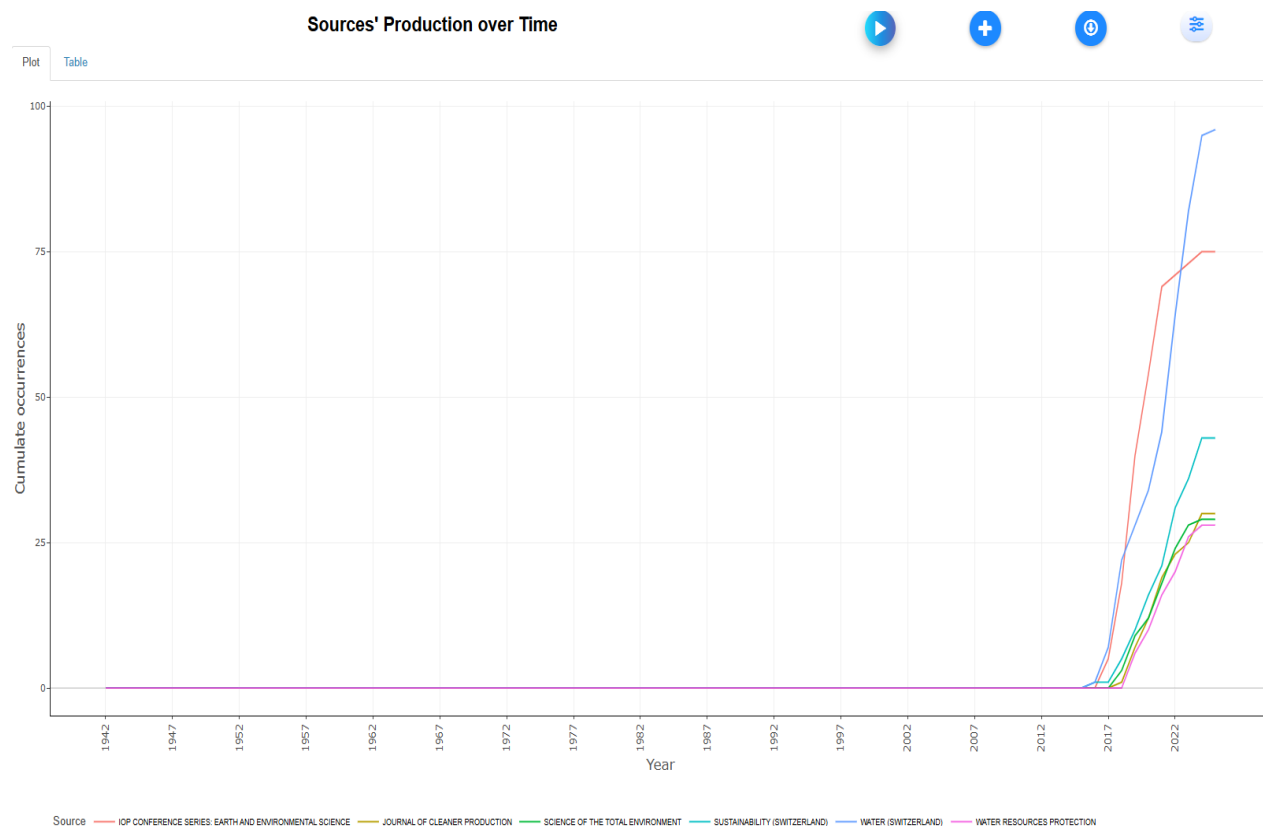
Después de realizar un análisis detallado de los artículos seleccionados, se pudo observar que a partir del 2017 se ha presentado un aumento significativo en el número de investigaciones acerca del tema. Este patrón se evidencia en el gráfico que se presenta en la Figura 2, donde se

resalta un considerable crecimiento en el índice de producciones partiendo del año mencionado hasta la actualidad.

Durante los últimos años se ha abordado este campo con mayor seriedad, por ende, la información en su gran mayoría se encuentra actualizada, lo cual proporciona fundamentos sólidos para ser analizados con suficiente claridad. Estos datos fueron publicados por diversas fuentes, lo que brinda acceso a diferentes perspectivas, entre ellas las que se mencionan en las revistas Water e Iop Conference Series: Earth and Enviromental SCI, quienes lideran la cantidad de aportes científicos.

Figura 2

Crecimiento de la cantidad de fuentes por año

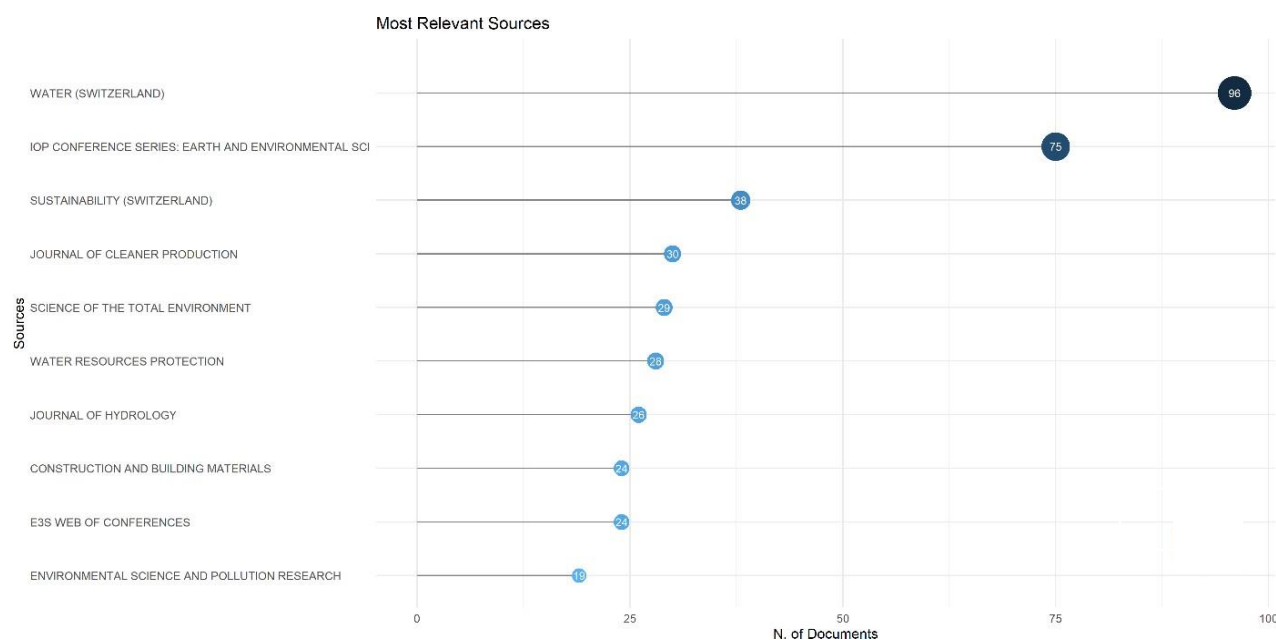


Nota. Obtenido de Bibliometrix 2025

En la figura 3, se expone un gráfico en el cual se evidencian las fuentes más relevantes del estudio. Como se mencionó en el anterior párrafo, las fuentes más destacadas son Water e Iop Conference Series: Earth and Enviromental SC, siendo los máximos exponentes, por lo que deberían ser priorizadas por investigadores al albergar un gran volumen de literatura relevante y de esta manera poder maximizar la difusión de sus trabajos en estas áreas.

Figura 3

Fuentes más relevantes



Nota. Obtenido de Bibliometrix 2025

En esta búsqueda, teniendo en cuenta la base de datos de Scopus y una vez realizado el análisis bibliométrico, se obtuvo una determinada serie de palabras que se destacan debido a la

resaltan expresiones como "China", con una presencia del 10%, seguida de ciertas palabras como “urban planning”, “water pollution” y “green infrastructure”, “rainfall”, con un porcentaje del 2% y 1% respectivamente.

Es de gran importancia mencionar la orientación que tiene la terminología, ya que se dirige hacia la ciudad esponja, y, aunque representan diferentes porcentajes, están estrechamente relacionados con este concepto, por lo que, en conjunto alcanzan una relación que considera a la mayoría del porcentaje total.

Figura 5

Frecuencia de las palabras clave



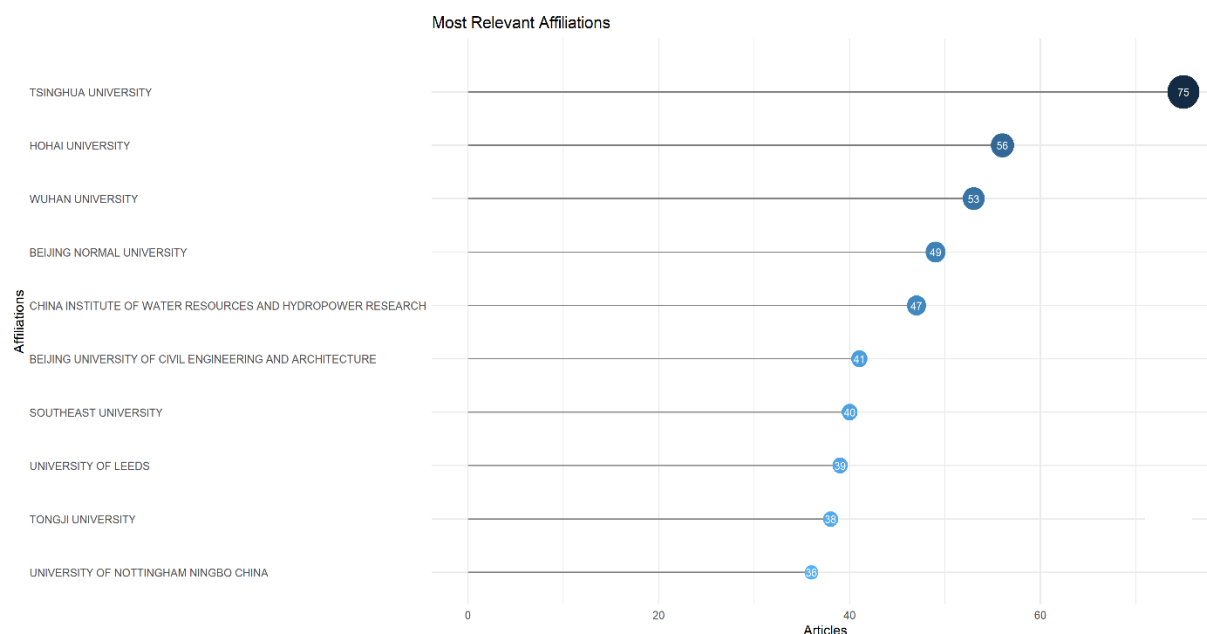
Nota. Obtenido de Bibliometrix 2025

La figura 6 muestra las 10 principales afiliaciones que han contribuido a esta investigación, se puede evidenciar la cantidad de aportes científicos de ciertas universidades tales como “Tsinghua university”, “Hohai university”, “Wuhan university” y “university of leeds”, las cuales ofrecen un indicio acerca de los objetivos principales en las investigaciones. Por esto, su elevada producción en cuanto a los artículos propone un enfoque innovador y dan orientación del panorama actual en el campo de estudio. Del mismo modo, la alta representación de las instituciones de Asia demuestra la relevancia actual en la investigación y las posibles colaboraciones en esta área del conocimiento.

Por otra parte, en lo que hace referencia al urbanismo sostenible, la infraestructura verde y gestión del agua, la institución de “Tsinghua university”, ha liderado la búsqueda de alternativas en cuanto a la manera de integrar estrategias en la gestión de dicho recurso dando respuesta a las problemáticas presentadas como lo son las inundaciones. Además, se puede resaltar que esta universidad ha estado trabajando en los estudios de caso en proyectos relacionados con ciudades esponja.

Figura 6

Instituciones más relevantes



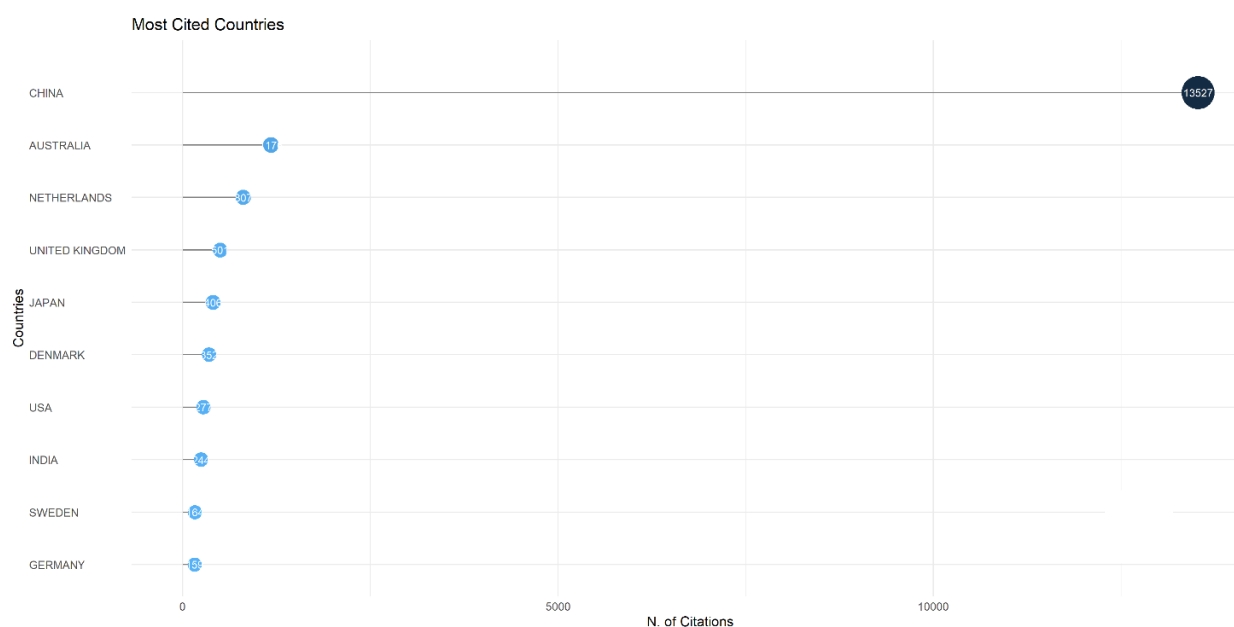
Nota. Obtenido de Bibliometrix 2025

Al realizar un análisis acerca de los países que han venido investigando en este campo, se observa una considerable diferencia entre los mismos, siendo el más destacado China, lo cual indica su puesta en marcha en cuanto a investigaciones innovadoras y su colaboración internacional. Por este motivo, países que se encuentran en un nivel bajo de conocimiento, e investigadores que deseen profundizar en el área, pueden fortalecer su estudio y, por lo tanto, su desarrollo académico.

En la figura 7 se logra distinguir la influencia de China, que sobresale a nivel mundial en investigaciones sobre las ciudades esponja, con una cantidad de 13.527 citaciones, tomando una notable ventaja sobre los demás países como Australia, que cuenta con 1700 citaciones, Holanda, con 807 citaciones y Estados Unidos con 277.

Figura 7

Citaciones por País



Nota. Obtenido de Bibliometrix 2025

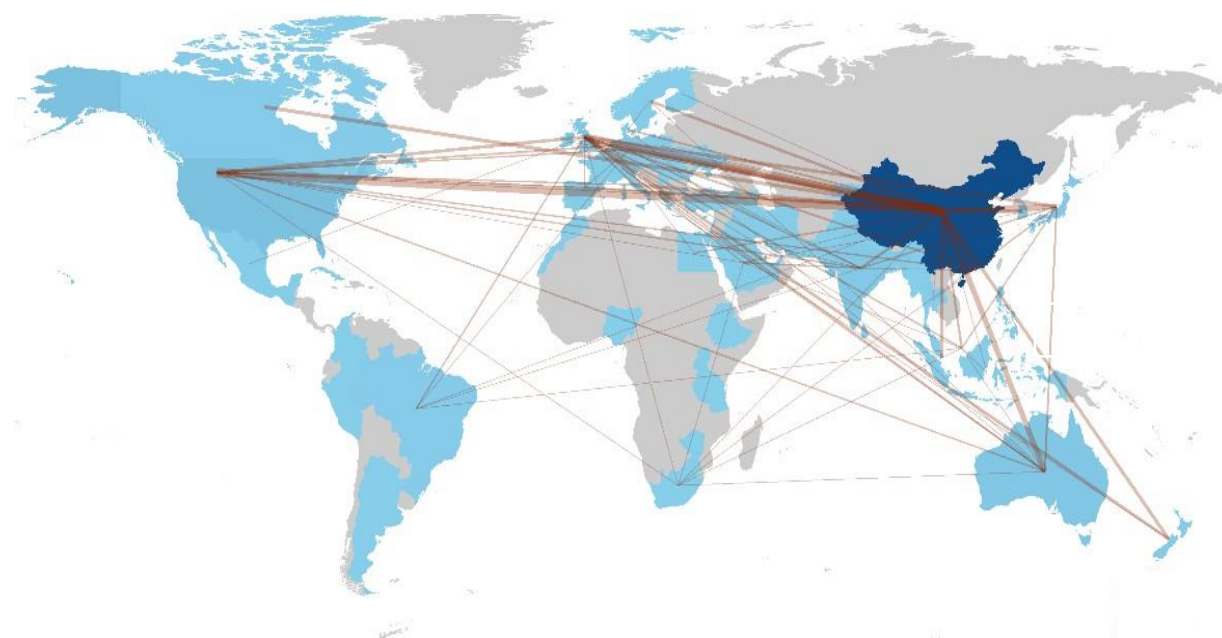
Por otra parte, en la figura 8 se presenta el mapa de las colaboraciones entre los países a nivel mundial, un recurso influyente en el que se expone los vínculos de la academia global, todo esto siendo útil para la toma de decisiones en las alianzas internacionales. Las conexiones que se pueden observar, resaltan la diversidad de las asociaciones, lo que refleja intereses comunes en la investigación y genera distintos puntos de vista para abarcar el tema con mayor profundidad.

Este diagnóstico contribuye a distinguir qué países están detrás de investigaciones influyentes en el mundo y cuyas alianzas son reconocidas en el entorno científico. De esta manera, se puede identificar el impacto significativo de los proyectos de investigación en colaboraciones conjuntas de determinados países. Además, se observa una desigualdad entre los

países desarrollados y en desarrollo, lo cual indica que no todos cuentan con las herramientas necesarias para abordar el tema de una manera más amplia.

Figura 8

Colaboraciones entre países



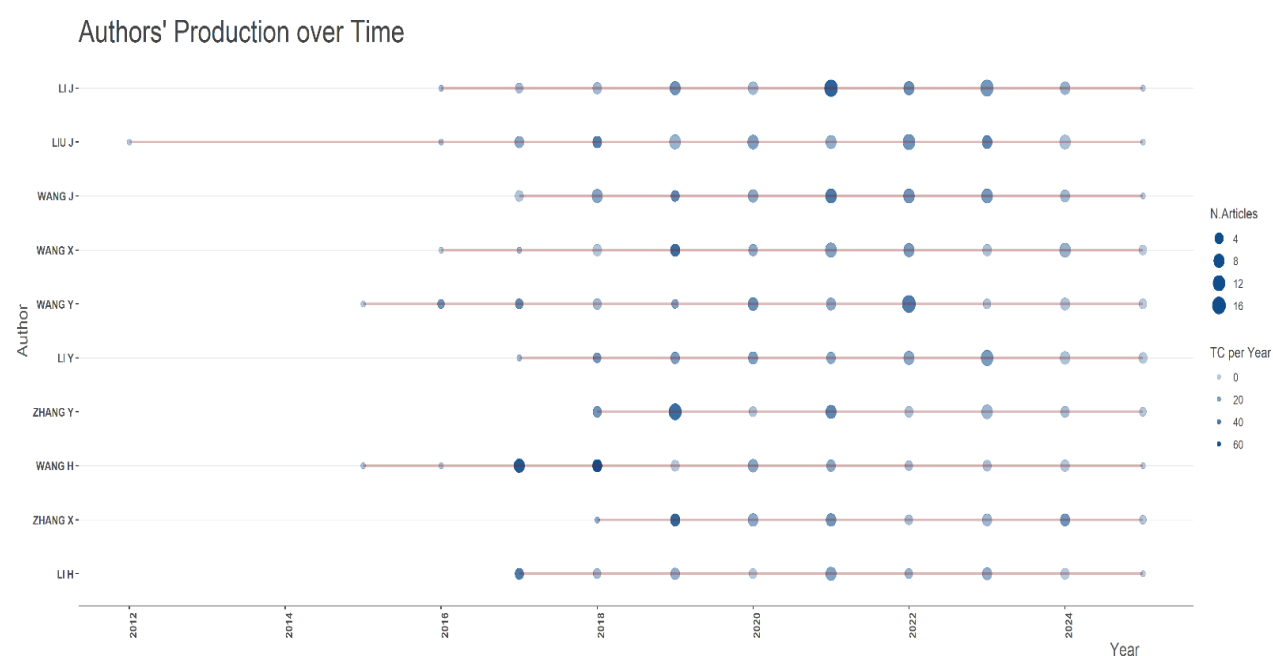
Nota. Obtenido de Bibliometrix 2025

La figura 9 muestra un diagrama de dispersión, el cual representa la evolución y producción a lo largo del tiempo de diferentes autores líderes en este campo de investigación. Se observa que el interés ha venido aumentando a lo largo de los últimos años, por lo que se destaca una mayor cuantía de publicaciones del tema de estudio. Se puede observar una lista de 10 autores, los cuales a partir del año 2017 han realizado como mínimo un aporte hasta el año anterior.

El uso de este componente puede facilitar la distinción de los autores que lideran en el área, cómo han motivado sus trabajos con el pasar de los años, tanto en la cantidad como calidad de sus estudios. Y de esta manera, analizar los detalles particulares de cada aspecto, todo esto, mediante una filtración minuciosa de las categorías de los documentos publicados.

Figura 9

Contribución de los autores a lo largo de los años



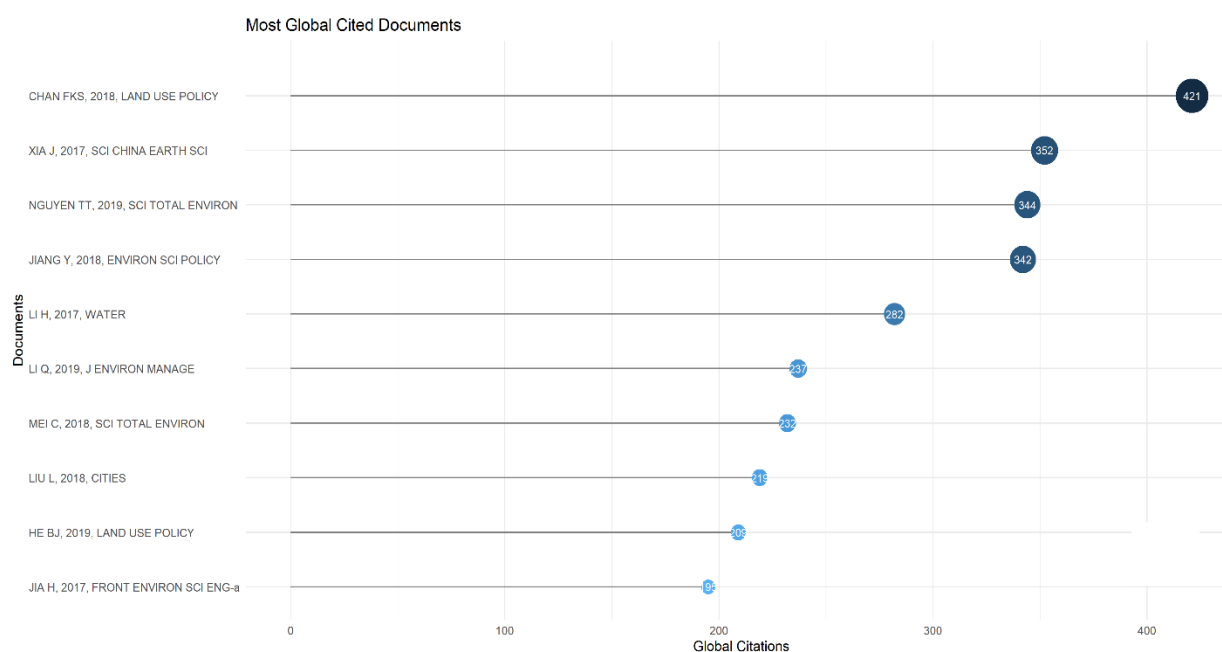
Nota. Obtenido de Bibliometrix 2025

En la figura 10, después de desarrollar el análisis bibliométrico, se presenta un gráfico acerca de los documentos más citados a nivel mundial. A partir de los datos arrojados se tiene que el impacto está enfocado en unos pocos representantes como se evidencia específicamente en 4 artículos que cuentan con más de 300 citas, por lo que se puede intuir que brindan una buena información y, por lo tanto, son títulos confiables.

Tomando como base lo anterior, la identificación de los trabajos más relevantes sirve como umbral para futuras investigaciones. La influencia que estas presentan, garantiza un mayor impacto a la comunidad científica al ser citados, ya que aumentan la visibilidad de los nuevos trabajos, además, ofrece información a los investigadores acerca de con quién colaborar y dónde publicar.

Figura 10

Documentos más citados



Nota. Obtenido de Bibliometrix 2025

1.2 Estado del arte

El agua como recurso vital para el bienestar de todos los seres vivos debe ser cuidada y conservada con la finalidad de proporcionar un futuro en el cual se pueda vivir, satisfaciendo las necesidades básicas de la humanidad, sin colocar en riesgo el medio en el que se subsiste. De

esta manera, el aprovechamiento del agua y su uso adecuado permite garantizar la preservación de esta fuente y la calidad de una vida digna (Reyes-Vidal et al., 2012).

El calentamiento global en los últimos años se ha afirmado a nivel ambiental como uno de los desafíos transcendentales alrededor del mundo. Por lo tanto, no debe ser evaluado solo como un acontecimiento de cambio climático, debido a que engloba un conjunto de problemas ambientales, económicos y sociales. Este fenómeno produce un incremento en la magnitud y periodicidad de sucesos adversos, como sequías, inundaciones y olas de calor. De esta manera, se hacen más vulnerables las poblaciones ante desastres naturales y la disponibilidad de agua para el consumo humano. Por este motivo se hace necesario una inversión considerable para la amortiguación de los daños ocasionados a los poblados y a su inmediata reedificación (Martens et al., 1998).

El crecimiento desmesurado de las ciudades ha afectado la hidrología natural, y la ausencia de una gestión adecuada en la urbanización ha dejado ineficiencias en las infraestructuras encargadas del sistema de drenaje, causando una disminución en la capacidad de infiltración y aumentando la magnitud de escorrentía. Todo esto genera una sobrecarga en dichos sistemas, volviéndolos obsoletos en períodos de lluvia intensa. (Dolz Ripollès & Gómez, 1994).

En consecuencia, a lo mencionado anteriormente y sumado a las restricciones que presentan los drenajes urbanos convencionales, se ha expuesto la necesidad de poner en marcha enfoques innovadores tanto en funcionalidad como sostenibilidad, para atender los desafíos presentes. En este contexto, la gestión de los recursos hídricos emerge como un aspecto

fundamental y requiere que se planteen estrategias como solución a esta problemática (Fletcher et al., 2015).

Debido al desafío significativo que puede representar el manejo del medio hídrico de manera integral, la tendencia mundial en los últimos años, abarca el tratamiento avanzado del recurso y su posterior reutilización. En este sentido, distintas entidades bajo el estado, han impulsado su análisis como un pilar fundamental para el cuidado del medio ambiente, el desarrollo sostenible, la viabilidad de la conservación del agua y su optimización (Reyes-Vidal et al., 2012).

La recuperación y aprovechamiento de las aguas constituye una alternativa esencial muy importante para que se puedan afrontar las crisis hídricas tanto por factores naturales como antropogénicos. Esto es particularmente crítico en el contexto actual, donde las alteraciones al clima y los cambios en los patrones de precipitación exigen el fortalecimiento de infraestructuras resilientes por parte de la sociedad y la incorporación de estrategias innovadoras para la regulación del agua ante eventos de sequía. (Álvarez Pinzón, 2017).

Considerando las problemáticas planteadas anteriormente, surge el concepto de Ciudad Esponja. Las ciudades esponja reemplazan el sistema convencional mediante la implementación de infraestructura verde (IG) como humedales urbanos, superficies permeables y sistemas de captación de agua, todo esto mediante alternativas basadas en el funcionamiento de la naturaleza. Así pues, debido a la infiltración del suelo, el agua se retiene temporalmente y se libera de forma gradual, lo cual mitiga las inundaciones y promueve la adaptabilidad de las ciudades ante

situaciones climáticas adversas, por lo tanto, brinda solución a los desafíos del drenaje urbano (Femin & George, 2022).

Actualmente para enfrentar los desafíos ambientales diferentes países alrededor del mundo han visto la necesidad de reducir estos impactos mediante la implementación de este enfoque innovador, como es el caso de las iniciativas lideradas por China que demuestran una estrategia alternativa para abordar la escasez de agua y los problemas que enfrentan muchas ciudades hoy en día. Al integrar la IG de la naturaleza en los sistemas de gestión de aguas urbanas, la ciudad esponja ofrece un enfoque más holístico y resiliente para gestionar las escorrentías, la contaminación y los recursos hídricos en entornos urbanos en comparación con los sistemas tradicionales, la "infraestructura gris" (Han, Wang, Deng, & Lichtfouse, 2023).

Del mismo modo, en Europa se han llevado a cabo este tipo de estrategias, a través de tejados vivos, cubiertos de musgo, edificios de colores claros, humedales urbanos y franjas verdes tal como sucede con Berlín, el cual se ha basado en medidas realizadas a los paisajes urbanos, logrando así que el agua retenida se evapore gradualmente (Senge, 2022). Por otro lado, en Copenhague se han rediseñado unos 250 espacios públicos para retener o redireccionar las aguas de inundaciones, en lugares como parques y en la rotonda de la Plaza de Sankt Kjeld (Fumero, 2020). Además, en España, con la colaboración del gobierno y parte de la comunidad, se cuenta con más de 50 proyectos que imitan a la naturaleza para adaptarse al cambio climático (Conama, 2021).

Por su parte, en América Latina, a pesar de la poca documentación acerca de las ciudades esponja como solución a dicha problemática, se están desarrollando iniciativas, como es el caso de Brasil, específicamente en la ciudad de Curitiba, donde se han aplicado sistemas de gestión integrada del drenaje urbano con estanques de retención y, en la ciudad de Recife, la cual ha establecido que para que un proyecto con áreas de cubiertas superiores a $400m^2$ tenga su aprobación es necesaria la integración de techos verdes (Przezzelska et al., 2024).

Así pues, a través de la realización de estos proyectos basados en el medio ambiente y que imitan a la naturaleza, estos entornos sostenibles ofrecen una serie de beneficios para que las ciudades logren enfrentar los desafíos en la urbanización moderna en base al manejo del recurso hídrico a raíz del cambio climático. En este contexto, se analizan en perspectiva de su contribución a la sostenibilidad integral, considerando los ámbitos social, ambiental y económico (Senge, 2022).

Consecuentemente se presentarán algunos de los beneficios que se obtienen con la aplicación de las ciudades esponja, previamente mencionados:

Desarrollo de áreas públicas integrales: partiendo de la ingeniería hidrológica, la gestión ambiental y el diseño urbano sostenible, se crean espacios públicos multifuncionales con los principios de la IG. Todo esto, para ofrecer espacios recreativos que potencian la resiliencia de los ecosistemas metropolitanos, aportando a una mejor calidad de vida y cohesión social (Montazeri, 2024).

Fortalecimiento de la resiliencia ecológica en entornos urbanos: se fomenta la biodiversidad urbana en combinación de la infraestructura convencional con los componentes sustentados en procesos naturales. Estos, tales como las áreas verdes y los humedales urbanos, creando ecosistemas propicios para la diversidad de especies de flora y fauna (Montazeri, 2024).

Reutilización del agua pluvial: mediante sistemas de captación y almacenamiento del agua, representan un avance significativo en la eficiencia del ciclo del agua urbano. Según Wang et al. (2021) en *Journal of Hydrology*, el porcentaje de reutilización de este recurso es de aproximadamente del 40-50%, por lo que de esta manera se estaría contribuyendo a la optimización del consumo de agua y apoyando a prácticas ambientalmente responsables a través de actividades como lo son la limpieza urbana, el riego de áreas verdes y la refrigeración de edificios.

Mejoramiento de las condiciones del agua: se reduce su contaminación en cuerpos del medio hídrico, a partir de la filtración y depuración del agua pluvial, debido a la incorporación en el urbanismo de modelos enfocados en sistemas de la naturaleza a manera de jardines e infraestructura de retención y filtrado natural. Así, al obtener una mejora en el estado del recurso hídrico, se aporta al incremento de la salud pública, dado que fomenta actividades al aire libre y, por ende, reduce el estrés (Montazeri, 2024).

Regulación del microclima: Maximización del confort térmico de los habitantes en los espacios metropolitanos como lo afirman las investigaciones de Li et al. (2022) en *Urban Climate* en las que se evidencia una disminución de la temperatura entre 2-3.5°C. Fomentando

así ecosistemas más resilientes y adaptativos debido a la presencia de cuerpos de agua y vegetación en las ciudades esponja, incluyendo techos vegetables, corredores verdes y pavimentos de alta reflectancia (Li et al., 2022).

Mitigación del riesgo de inundaciones: la adopción de estas estrategias como lo son los techos verdes, humedales construidos, pavimentos permeables y trincheras de infiltración, actúan como membranas hidráulicas dinámicas y permiten una disminución de inundaciones hasta del 75% (Xiao et al., 2020). Lo anteriormente mencionado se logra mediante la captación y almacenamiento de la precipitación, disminuyendo el flujo de afluencia y, por ende, la amenaza de anegamiento en entornos urbanos (Xiao et al., 2020).

De este modo, así como las ciudades esponja ofrecen una gran serie de beneficios, también se tienen ciertas limitaciones al respecto que deben ser tenidas en cuenta. Empezando por el déficit normativo y formativo actual, con una falta de educación y capacitación en la planificación y diseño debido a las limitaciones en cuanto a directrices específicas, lo cual restringe la capacidad para implementar proyectos de manera efectiva sumado a las características climáticas y geográficas que condicionan el diseño de infraestructuras hídricas urbanas sostenibles (Li et al., 2017).

La ausencia de lineamientos para su puesta en marcha ha generado dificultades relacionadas con su implementación técnica, que puede realizarse de manera incorrecta, sin tener en cuenta un análisis matemático o hidrodinámico, causando riesgos hidrológicos por la inadecuada aplicación debido a lo mencionado anteriormente. Por otra parte, el desarrollo de las

ciudades esponja se ve obstaculizado por una incipiente industria de materiales ecológicos en la que no se cuenta con el suficiente avance tecnológico local lo que implica la necesidad de las importaciones para que sistemas como los techos verdes o pavimentos permeables se adapten a las condiciones de la región (Li et al., 2017).

Además, existen limitaciones en lo que hace referencia a lo urbanístico y económico dado que las medidas para llevar a cabo las ciudades esponjas requieren de espacio adicional, lo que genera un incremento en los gastos. Así pues, suelen priorizar la edificabilidad sobre las consideraciones de sostenibilidad, lo que reduce la posibilidad de la implementación de IG, especialmente las que necesitan de espacio adicional para almacenar y tratar las aguas pluviales (Li et al., 2017).

Por estos motivos, la ciudad esponja es un campo de estudio el cual debe ser abordado con seriedad, por lo cual es de gran utilidad contar con una recopilación de información acerca de la misma con la finalidad de ampliar el conocimiento existente y contribuir al avance de este enfoque innovador y estratégico. Además, esto proporciona a la comunidad en general una visión actual de lo que se está implementando para gestionar el uso del agua y mitigar el impacto ambiental generado por el cambio climático (Rau, 2024).

Capítulo 2: Estructuras sostenibles utilizadas para la ejecución de las ciudades esponja

Las estructuras sostenibles en los últimos años han generado gran interés debido a la posibilidad de optimizar el uso de los recursos naturales e incentivar el desarrollo ambientalmente responsable. Esto se ha visto reflejado en la introducción de los Low Impact Development (LID) y los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los cuales han aportado avances al manejo eficiente de la escorrentía pluvial al integrar diferentes medidas tales como techos verdes, zanjas de pasto, sistemas de biorretención, pavimentos permeables, etc. mitigando la contaminación de las aguas y disminuyendo la escorrentía (Li et al., 2016).

Estos sistemas trabajan en conjunto para componer las ciudades esponja. Al incluir todas estas alternativas, tal modelo urbano garantiza el manejo del agua de manera efectiva con el fin de generar un ajuste hacia una planificación constructiva y urbana, adaptable con el entorno. De este modo, se da respuesta a las exigencias de las sociedades actuales y futuras en lo que respecta al cambio climático (Li et al., 2016).

En consecuencia, se busca dar a conocer las estructuras mencionadas anteriormente con el objetivo de que sea más comprensible sus características y funcionamiento, asegurando información actualizada de las prácticas que se están implementando hoy en día.

A continuación, se expondrán los principios previamente indicados:

2.1 Zanjas de pasto

Mediante del proceso de filtración y sedimentación, estas son capaces de mejorar la calidad del agua, debido a que cuentan con franjas con poca pendiente y densamente vegetadas. Generalmente se combinan con trincheras y estanques para lograr un pre tratamiento y disminuir las posibles obstrucciones por sedimentos, con el fin de aumentar su vida útil. Su principal ventaja es que no necesita de un mantenimiento para prevenir dicha colmatación, como se muestra en la figura 11 (Espinosa, 2011).

Figura 11

Franja de pasto y trinchera



Nota. La imagen representa las franjas vegetadas. (Espinosa, 2011)

2.2 Trincheras

Utilizan las franjas de pasto para la conducción del agua hacia las mismas donde se retiene por un lapso de tiempo. Esta estructura se trata de una excavación de poca profundidad en la que se cubre con grava gruesa y se extrae el agua a través de una tubería perforada o mediante infiltración. Del mismo modo, recibe el agua de forma lateral y aporta a un incremento en la efectividad del tratamiento del agua (Espinosa, 2011).

Figura 12

Trincheras



Nota. Se ilustra el proceso constructivo de las trincheras. (Espinosa, 2011)

2.3 Jardines de biorretención

Son los más utilizados al momento de gestionar las aguas de lluvia, realizan un proceso conocido como bio tratamiento, mediante el cual, las plantas eliminan los contaminantes de

aguas lluvias presentes luego de la obstrucción y degradación de los mismos. Están constituidos por un estrato de drenaje con grava en la base; un estrato de transición, de arena gruesa y luego de arena fina; un estrato filtrante y por último la capa vegetal. De esta manera, tratan la calidad del agua a través de los jardines, en zonas de baja profundidad (Ortiz-Hernández et al., 2013).

Figura 13

Área de biorretención



Nota. Se observa la aplicación de un sistema de biorretención. (Espinosa, 2011)

2.4 Sistemas geo celulares o modulares

Su ventaja radica en su amplio soporte para almacenar el agua, debido a que es capaz de almacenar hasta un 94% por cada módulo. Además, permiten combinarse con los pavimentos permeables y ser utilizados bajo vías o estaciones, por ende, resisten las densidades del tráfico, almacenando el agua lluvia ya sea por recintos de almacenamiento o pozos de infiltración (Espinosa, 2011).

Figura 14

Módulos plásticos



Nota. Se evidencia la estructura de un sistema geo celular. (Espinosa, 2011)

2.5 Filtros de arena

Muy implementados en los Estados Unidos, consisten en un sistema de tratamiento del agua realizado con una excavación aislada llena de grava, posteriormente la instalación de un geotextil y un relleno del nivel bajo hasta el tope de arena. Todo esto, con el objetivo de que no pasen partículas finas hacia la tubería perforada (Espinosa, 2011).

Figura 15

Filtro de arena



Nota. La imagen muestra la conformación de un filtro de arena (Espinosa, 2011)

2.6 Estanques de infiltración

Con la finalidad de que se realice la infiltración, estos estanques tienen que construirse en lugares con una capa freática en relación con el nivel inferior. Así pues, estas estructuras depositan por un lapso de tiempo el agua y realizan percolación, presentes ya sea en espacios verdes, jardines o terrazas (Espinosa, 2011).

Figura 16

Estanque de Infiltración



Nota. Se hace visible un depósito de infiltración en espacios verdes. (Espinosa, 2011)

2.7 Estanques de detención

Considerados una estructura hidráulica, la cual, durante los incidentes de lluvia, logran gestionar y controlar el escurrimiento superficial, por lo que de esta manera son capaces de amortiguar el flujo y los picos de caudal, debido a la pérdida de velocidad en su proceso de sedimentación (Espinosa, 2011).

Estos, a diferencia de los estanques de infiltración tienen como función principal mantener el agua embalsada, de esta forma, pueden ser implementados en áreas donde el uso no sea especificado y brindaría este recurso para usos secundarios, como fines recreativos, paisajísticos e incluso, como hábitats para la fauna local (Espinosa, 2011).

Figura 17

Cuenca de detención



Nota. Se refleja un estanque de detención de agua pluvial. (Espinosa, 2011)

2.8 Humedales artificiales

SUDS desarrollados con zonas pantanosas y de los más usados para el manejo de los contaminantes en la escorrentía, controlando los mismos en áreas urbanas, combinando la separación de los distintos contaminantes y la atenuación de picos. El funcionamiento de los humedales, consta del acopio del agua arriba de los mínimos niveles para darle a la vegetación acuática y a los microorganismos su supervivencia (Peña Guzmán & Lara Borrero, 2012). La primera instalación de un ecosistema de humedal se estableció en Brasil en la zona de América Latina y el Caribe durante el periodo de 1980 (Salati y Rodrigues, 1982). No obstante, su adopción prontamente se expandió desde comienzos del siglo XXI, con mayor presencia en el país anteriormente mencionado y en el territorio mexicano. (Zhi y Ji, 2012).

Si bien la gran parte de estas estructuras son pequeñas, existe la posibilidad de combinar la infraestructura gris y verde mediante modelos híbridos con mayor envergadura permitiendo responder a las demandas de las áreas metropolitanas. Este procedimiento da gran relación costo beneficio, además de aportar un bien paisajístico a las zonas urbanizadas y optimar la biodiversidad. Por esto, como herramienta, este ha logrado ser aceptado dentro de los desarrollos de bajo impacto (Peña Guzmán & Lara Borrero, 2012).

Figura 18

Humedal artificial



Nota. La imagen contempla un humedal artificial con vegetación acuática. (Espinosa, 2011)

2.9 Techos verdes

Conjuntos de varias capas de vegetación como cubierta vegetal instaladas en tejados y terrazas. Gracias a la impermeabilización, sustrato y vegetación, pueden realizar una mayor

retención de agua lluvia, en la que se ven reducidos los caudales que llegan al drenaje, mejorando la calidad de la misma. Como beneficio de su implementación, actúan como aislantes naturales de calor, logran disminuir la temperatura en el interior de los edificios, contribuyendo al confort térmico (López et al., 2015).

Su diseño debe tener en cuenta la capacidad estructural y portante del edificio, la resistencia a la penetración de raíces en el tejado y verificar que se cuente con una correcta impermeabilización para contrarrestar o evitar los problemas de humedad (López et al., 2015).

Figura 19

Techos verdes



Nota. Se representa la ejecución de un techo verde en una vivienda. (Espinosa, 2011)

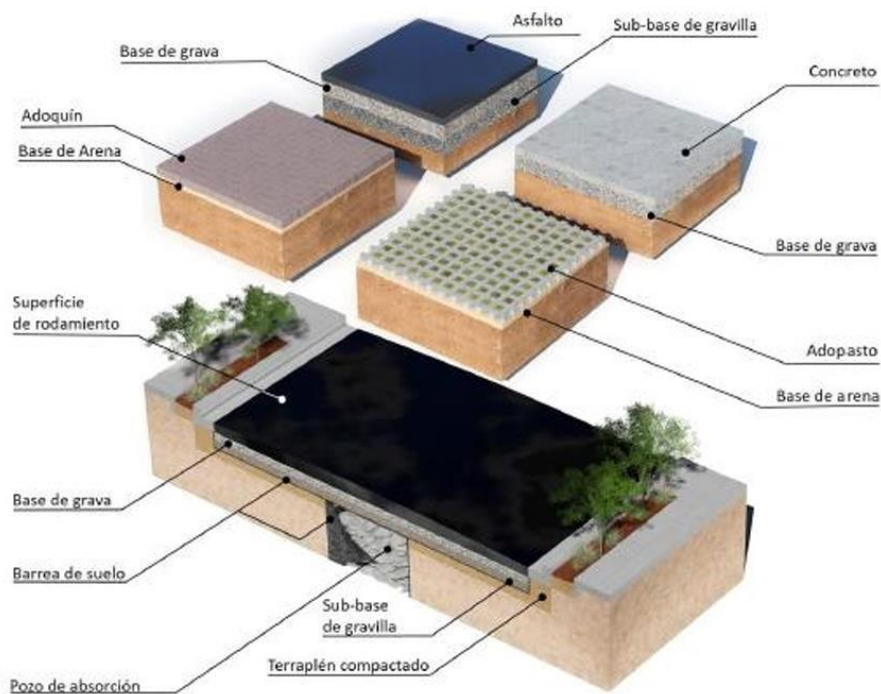
2.10 Pavimentos permeables

Técnicas de alternativas de drenaje urbano, la cual se basan en unas superficies diseñadas para capturar el agua de lluvia, con el fin de que no se genere escorrentía y se infiltre el agua al suelo subyacente. Estas son capaces de tomar un 80 – 100% del agua, lo cual aliviana la carga sobre el drenaje urbano, previniendo de esta manera el riesgo de inundaciones (Espinosa, 2011).

Este tipo de pavimento está compuesto por materiales como concreto poroso, grava compactada o adoquines con juntas permeables, y deben ser instaladas en entornos urbanos con capas que favorezcan el drenaje e infiltración (Espinosa, 2011).

Figura 20

Pavimento permeable



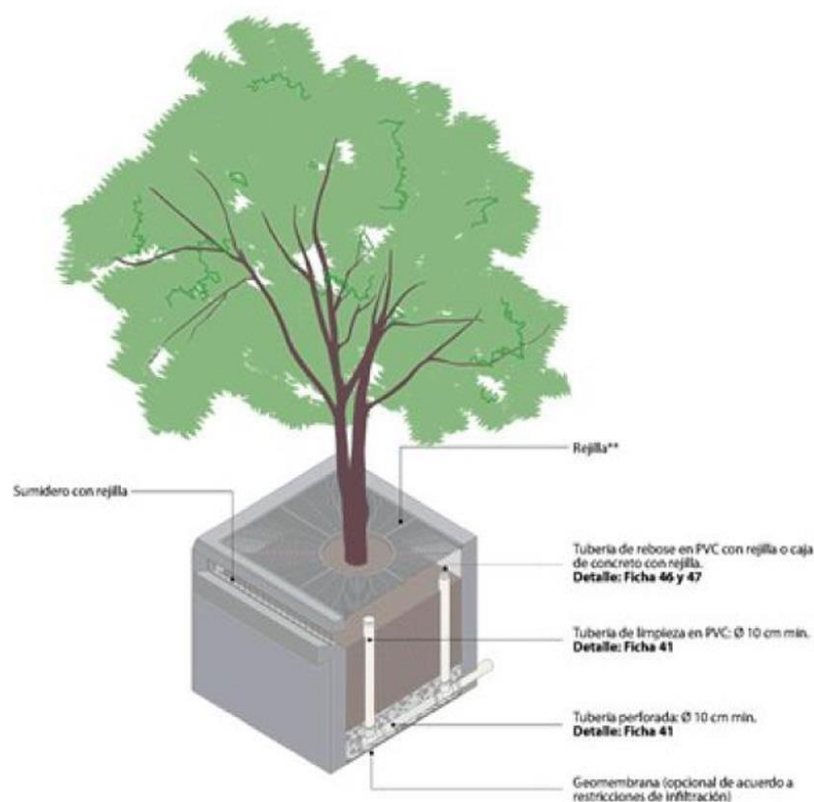
Nota. Ilustración de las respectivas capas de un pavimento permeable. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)

2.11 Alcorques inundables

Son conocidos por su filtración biológica, al ser zonas donde el terreno tiene la habilidad de captar naturalmente el agua debido a su estructura especial la cual permite almacenar el flujo de las aguas pluviales y el desarrollo radicular de la vegetación presente en el entorno. Estos contribuyen a la disminución del calor en las áreas urbanas mediante su sombra, lo que mitiga el efecto de isla de calor en las ciudades (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

Además, no solo aportan beneficios en la captación de la precipitación, optimizando la transpiración, reduciendo el impacto de las lluvias sobre el escurrimiento superficial, mejorando la absorción del agua en el suelo mediante su estructura subterránea, sino que también aportan al ámbito ambiental dado que se fomenta la biodiversidad en los entornos urbanos creando así una armonía en los paisajes de los mismos y dado esto, se mejora en la calidad del aire (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

En cuanto a la estructura de los alcorques, la capa filtrante suele estar constituida por dos estratos, uno con una proporción de 8 partes de partículas minerales por cada dos partes de materia orgánica descompuesta, la cual también puede ser complementada con 8-10cm de mulch. Esta combinación junto con su sistema radicular, filtra la contaminación presente en el agua, mostrando una alta capacidad de retener nutrientes y compuestos oleosos (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

Figura 21*Alcorque inundable*

Nota. Se observa cómo está compuesto un alcorque inundable. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)

2.12 Pozo de infiltración

Son excavaciones que presentan una estructura de drenaje sostenible, su función es optimizar el flujo hídrico y su infiltración para la rehabilitación de reservas subterráneas promoviendo así la infiltración del agua en el subsuelo de manera controlada. Estos sistemas se pueden construir relleno con materiales permeables como grava o piedra, que facilitan el paso del agua hacia el suelo subyacente y también con estructuras utilizadas en albañilería que

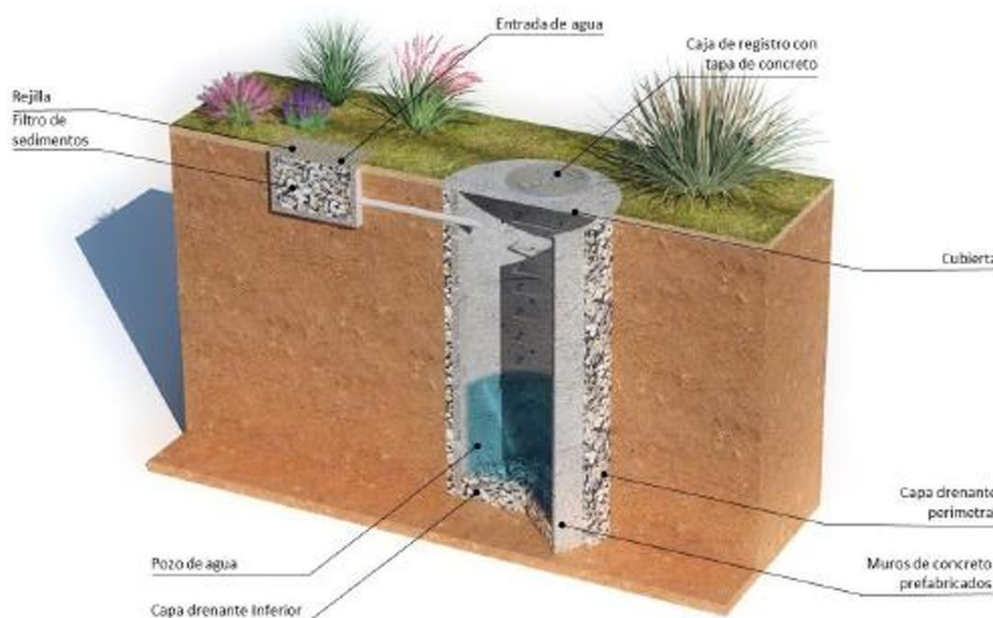
incorporen aperturas o que brinden propiedades permeables como un hormigón diseñado (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

En consecuencia, estos modelos técnicos implementan una metodología de ingeniería que permite la transferencia eficiente de volúmenes hídricos desde la superficie hacia formaciones geológicas subterráneas aportando al manejo sostenible del agua gracias al sistema basado en infiltración que los constituye, y, que involucra capas de sedimento, sistemas de control de flujo y zonas de transición litológica. En algunos casos se utilizan geotextiles para evitar obstrucciones por lo que se requiere poco mantenimiento, sin embargo, es necesario realizar inspecciones periódicas a fin de garantizar su eficiencia (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

De esta manera, al tener la estructura mencionada, los pozos de infiltración brindan ciertos beneficios, entre ellos se pueden destacar que pueden penetrar capas de suelo impermeables sin ocupar espacio superficial. Por estos motivos, se resalta su importancia fundamental en los SUDS dado que ayudan a mitigar el impacto ambiental de la escorrentía y mejoran la calidad del recurso hídrico (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

Figura 22

Pozo de infiltración



Nota. Secciones de un pozo de infiltración. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)

2.13 Drenaje Francés

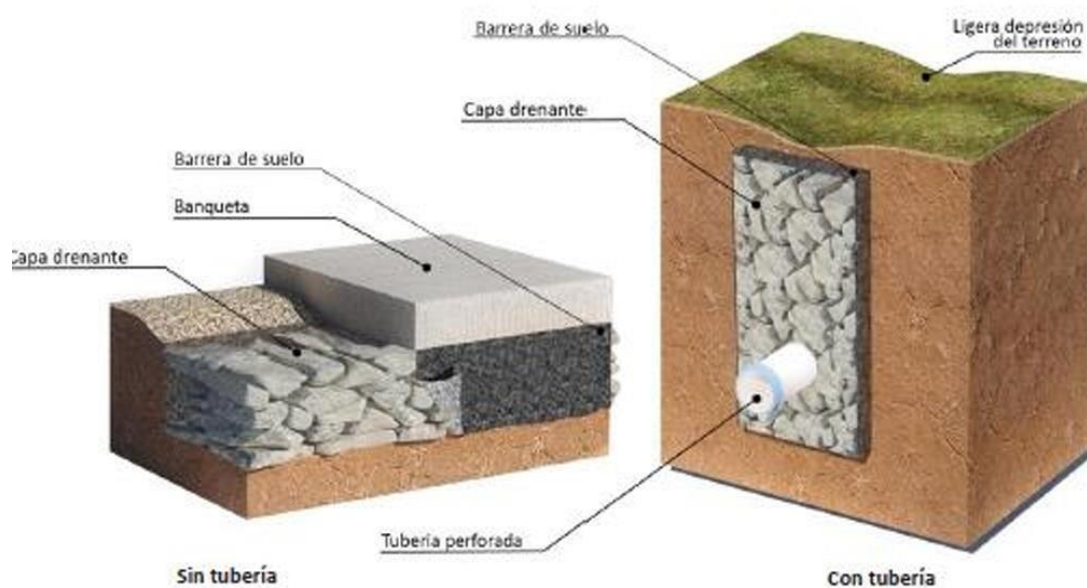
Este tipo de estructura consta de un sistema de drenaje subterráneo constituido por una excavación rellena de rocas, con un coeficiente de 0,4 para captar el agua presente en el nivel filtrante. Así mismo, es posible aumentar su capacidad de captación mediante una tubería perforada que canaliza el agua hacia un punto de descarga. Su diseño hace que el agua fluya a través de las perforaciones en las tuberías, filtrándose gradualmente a medida que pasa por la grava, mejorando la estabilidad del suelo y evitando daños estructurales o erosión (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

Este sistema se utiliza principalmente en suelos con problemas de drenaje, como áreas de césped, jardines o cerca de cimientos de edificaciones, funcionando eficazmente en terrenos con buena capacidad de permeabilidad. Utilizando técnicas de ingeniería geohidrológica, su función principal es interceptar y conducir aguas freáticas, prevenir la acumulación de humedad cerca de

cimientos, controlar la presión hidrostática y mitigar los problemas de encharcamiento o deterioro en estructuras arquitectónicas o terrenos con alta saturación hídrica. De esta manera, el drenaje francés facilita el cuidado de las edificaciones en cuanto a humedad, se puede diseñar con el fin de no ocupar el área superficial, permite el acceso de agua y si el espacio es reducido, puede lograr a que alternativas técnicas aumenten su porcentaje de almacenamiento (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

Figura 23

Drenaje francés



Nota. Estructura específica para la construcción de un drenaje francés. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)

2.14 Muros vegetales

Corresponden a estructuras llevadas a cabo en superficies verticales implementando vegetación en estas, diseñadas para integrarse a la arquitectura urbana. Estos diseños se realizan mediante paneles, estructuras metálicas o sistemas modulares en los que se cultivan plantas que cubren la fachada o pared del edificio, ya sea a través de un sistema de jardinería tradicional o a partir de tecnologías hidropónicas, es decir, métodos de cultivo de plantas sin tierra y mediante soluciones acuosas con nutrientes esenciales (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

De este modo, las fachadas o muros verdes generan beneficios como la reducción de la radiación solar directa, mejorando el aislamiento térmico y acústico, así como el incremento de la biodiversidad, la optimización de la eficiencia energética y la disminución de los contaminantes urbanos, contribuyendo a mejorar el entorno urbano. Para su implementación, se deben considerar aspectos como el tipo de planta, el sistema de riego y la capacidad estructural del edificio, además de realizar un mantenimiento adecuado para garantizar la salud de la vegetación (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

Figura 24

Muros vegetales



Nota. Componentes de una fachada verde. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)

Por estos motivos, todos estos sistemas hacen parte de la infraestructura verde (IG), dando un enfoque diferente para preservar el agua, garantizando diversas ventajas ambientales y apoyando a la sustentabilidad. La IG sugiere una alternativa para el tratamiento de las aguas pluviales mediante la cobertura vegetal, reemplazando la infraestructura gris que usa tuberías para eliminar el agua pluvial y mitigando el riesgo de inundaciones (Fletcher et al., 2015).

A continuación, se expone a manera de resumen mediante una tabla, las estructuras sostenibles anteriormente mencionadas, que hacen parte de una ciudad esponja y que brindan una perspectiva completa acerca de la infraestructura verde. Esta sigue lineamientos sostenibles que buscan contribuir el cuidado de los ecosistemas y el uso adecuado del agua, abordando desafíos como la contaminación generada en el aire y el riesgo de inundaciones debido a la escorrentía.

Por estos motivos, estas soluciones basadas en la naturaleza reemplazan las funciones del suelo, liberando la carga hídrica del mismo y de las estructuras de drenaje convencionales mediante sus funciones como la infiltración y regulación del agua.

Tabla 1*Estructuras sostenibles de una ciudad esponja*

Estructura	Tipología	Contexto operativo	Desafío abordado	Consideraciones	Fuente
Zanja de pasto	Conjunto de filtrado y conducción	Corredores ecológicos, costados de calles, áreas urbanas.	Ayuda a disminuir el nivel de contaminación debido a la vegetación presente que retiene el material de sedimentos. Además, reduce la saturación del sistema convencional de drenaje mediante el proceso de infiltración del agua pluvial.	Debe estar conformada por una vegetación abundante y una pendiente baja para mejorar la filtración y sedimentación.	(Espinosa, 2011)
Trinchera	Sistema de captación e infiltración	Áreas impermeables, industriales y urbanas.	Reduce el volumen de agua que se dirige hacia el drenaje tradicional al retener por un tiempo determinado la afluencia de esta, de	Es preciso tener materiales tales como geotextil y grava, y un mantenimiento regular, evitando la colmatación.	(Espinosa, 2011)

Estructura	Tipología	Contexto operativo	Desafío abordado	Consideraciones	Fuente
			manera que la infiltración se realice gradualmente.		
Jardín de bio retención	Infraestructura de retención y filtrado	Entornos urbanos públicos, zonas de estacionamiento, parques	Realiza un tratamiento del agua, eliminando los contaminantes de aguas lluvias, mediante sus estratos de drenaje y su vegetación seleccionada.	Se requiere contar con estratos de grava, arena y capa vegetal absorbente y resistente a la humedad.	(Espinosa, 2011)
Sistema geo celular o modular	Infraestructura subterránea de almacenamiento y control	Vías, estaciones, zonas urbanas de densidad elevada	Disminuye la carga excesiva del alcantarillado debido a su gran capacidad de almacenar agua bajo la superficie, procediendo a la evacuación de esta hasta el sistema de drenaje o el subsuelo.	Es necesario que el sistema tenga la capacidad de carga estructural para resistir a un tráfico vehicular alto. Se recomienda usar geotextil para que no haya colmatación de sedimentos.	(Espinosa, 2011)

Estructura	Tipología	Contexto operativo	Desafío abordado	Consideraciones	Fuente
Filtro de arena	Conjunto de manejo y filtrado de agua	Espacios de captación, urbanos e industriales	Contribuye a una mejor calidad del agua a partir de la infiltración llevada a cabo a partir de su medio filtrante que se compone de grava y arena.	Es recomendable realizarse en un espacio aislado, con grava, geotextil y arena. Recomendable realizar un mantenimiento constante para prevenir la obstrucción del sistema.	(Espinosa, 2011)
Estanque de infiltración	Sistema temporal de retención e infiltración	Espacios verdes abiertos, jardines, zonas con suelos permeables	Su función consiste en evitar el riesgo de inundaciones a través de la acumulación del agua pluvial por un lapso de tiempo y seguido a esto, infiltrar progresivamente la misma en el suelo.	Debe constituirse de una capa freática en relación con el nivel inferior, así como de medidas para evitar la colmatación.	(Espinosa, 2011)

Estructura	Tipología	Contexto operativo	Desafío abordado	Consideraciones	Fuente
Estanque de detención	Sistema provisional de retención y regulación de agua	Áreas urbanas con peligro de inundaciones	Ayuda a una descarga controlada de grandes volúmenes de agua luego de captarla en periodos de lluvia intensa y retenerla de manera temporal.	Se sugiere prever de una estructura capaz de soportar las precipitaciones extremas y de controlar posteriormente el flujo de agua.	(Espinosa, 2011)
Humedal artificial	Infraestructura gris y verde de purificación natural	Zonas de rehabilitación ambiental y espacios protegidos	Gestiona la contaminación de la escorrentía a través de un proceso biológico y físico mediante su vegetación acuática.	Conviene tener un diseño de flujo controlado y preferiblemente de cobertura vegetal nativa a entornos acuáticos.	(Espinosa, 2011)
Techo verde	Sistema de detención y evaporación	Zonas altamente impermeables, construcción urbana	Contribuye a una mejora en el aire y una regulación térmica al interior de las edificaciones dado que	Debe incorporar un diseño óptimo que cuente con un drenaje eficaz que prevenga la acumulación de agua	(Espinosa, 2011)

Estructura	Tipología	Contexto operativo	Desafío abordado	Consideraciones	Fuente
Pavimento permeable	Infraestructura de filtración y disminución del agua pluvial	Entornos urbanos, ciclovías, vías peatonales	logra absorber y volatilizar el agua. Mediante su estructura se disminuye el volumen de escorrentía debido a que el flujo circula por este medio permeable, ayudando al reabastecimiento de agua subterránea.	de tal manera que regule su evacuación. Es imprescindible que este se encuentre conformado por materiales altamente porosos, proporcionando un mantenimiento adecuado para evitar que los sedimentos generen una obstrucción. Así, se logra un sistema eficaz y duradero.	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)
Alcorque inundable	Sistema de recolección y percolación	Arbolado presente en zonas urbanas	Brinda humedad a las raíces de árboles y arbustos, dado que almacena la escorrentía superficial, logrando	Es fundamental elegir materiales con una alta capacidad drenante y establecer un diseño que	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)

Estructura	Tipología	Contexto operativo	Desafío abordado	Consideraciones	Fuente
	para árboles urbanos		una temperatura más óptima en las superficies urbanas a través de su sombra.	maximice la captura del agua.	
Pozo de infiltración	Mecanismo de percolación profunda	Sectores densos, con escasa permeabilidad, alta densidad urbana	Favorece la conducción del flujo del agua hacia los estratos más profundos del suelo y con esto, mitiga la saturación de la misma.	Se hace necesario la presencia de materiales filtrantes tales como grava o piedra, así como geotextil para que este sistema funcione adecuadamente.	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)
Drenaje Francés	Infraestructura subterránea de recepción y transporte de agua	Zonas propensas a problemas de retención hídrica, con un grado de permeabilidad bajo.	Facilita la absorción de agua a través de su estructura, captando una gran cantidad de la misma, reduciendo los anegamientos y brindando un terreno firme.	Con la finalidad de que la estructura tenga un óptimo rendimiento, el diseño de este debe incorporar capas de grava y tuberías perforadas.	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)

Estructura	Tipología	Contexto operativo	Desafío abordado	Consideraciones	Fuente
Fachada o muro verde	Configuración vertical de regulación térmica y captación	Construcciones en regiones de alta concentración urbana	Favorece la disminución del impacto de la isla de calor dado que se regula la escorrentía y depura el aire.	Con el objetivo de un sistema funcional, se recomienda realizar una selección previa de las especies vegetales resistentes a una pared vertical, garantizando un riego adecuado de estas.	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022)

Capítulo 3: Normativa de los Sistemas de Drenaje Urbanos Sostenibles a Nivel Mundial

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se han transformado para el correcto manejo del agua como un requerimiento prioritario, en consecuencia, a las dificultades que las ciudades modernas afrontan. Para poder responder a la necesidad que se tiene, algunos países en todo el mundo, han optado por efectuar regulaciones que buscan la conservación del agua, los recursos naturales y la resiliencia urbana, mediante soluciones sostenibles, para reducir y mitigar los impactos ambientales.

Basado en lo anterior, el tener el panorama global claro de las distintas normativas adoptadas en los países, brinda un entendimiento sólido de cómo en distintos contextos urbanos se practica la eficiencia y sostenibilidad en cuanto a la gestión del agua que los SUDS incorporan.

A continuación, se explorarán marcos regulatorios clave que guían la implementación de los mismos:

3.1 China

El auge presente en este país en cuanto a los SUDS, ha llevado a que implementen enfoques más allá de los otros países, con el concepto de “Ciudades Esponja”.

Mediante las “**Especificaciones Técnicas para la Construcción de Infraestructuras de Ciudades Esponja (CJJ/T 245 – 2016)**” emitido por el gobierno chino en el que se incorporan criterios con la finalidad de llevar a cabo sistemas verdes urbanos, a través de estrategias que

enfatan la importancia de manejar el agua sosteniblemente, llevando a la conexión con el enfoque de las ciudades esponja (Ministry of Housing and Urban-Rural Development, MOHURD, 2016).

La regulación integra detalles de los requerimientos técnicos en cuanto a la planificación, así como a la ejecución que fusiona la infraestructura de manejo de precipitaciones y, que busca promover la infiltración, almacenamiento, limpieza y reutilización de dicho recurso para mitigar los daños ocasionados por eventos adversos extremos, gracias a que con los requisitos se permite gestionar el 70 – 80% de las precipitaciones en áreas designadas anualmente (Ministry of Housing and Urban-Rural Development, MOHURD, 2016).

Figura 25

Guía CJJ/T 245-2016

Contents	
1	General Provisions 1
2	Terms 2
3	Drainage Test Device 5
3.1	Drainage Test Tower 5
3.2	Testing Pipe System 6
3.3	Testing Device 6
3.4	Automatic Control System 7
3.5	Water Supply Device 8
3.6	Simulated Drainage Device 8
4	Test Method 9
4.1	General Requirements 9
4.2	Instantaneous Flow Method 9
4.3	Constant Flow Method 13
5	Criterion 15
Appendix A	Measuring Cylinder 16
Appendix B	Instantaneous Flow Generator 18
Appendix C	Dividing Tank 20
Appendix D	Air Tightness Test 21
Appendix E	Test Report 23
	Explanation of Wording in This Standard 27
	List of Quoted Standards 28
	Addition; Explanation of Provisions 29

Nota. La imagen abarca el contenido de la guía CJJ/T 245-2016 de China.

(Ministry of Housing and Urban-Rural Development, MOHURD, 2016)

3.2 Australia

En Australia se cuenta con el “**Manual de Drenaje Urbano Sostenible de Melbourne Water**”, en el que se proporcionan detalles sobre los sistemas sostenibles como humedales y vías fluviales. Cuenta con especificaciones técnicas de diseño, construcción y su respectivo mantenimiento. Su principal objetivo es mejorar la calidad del agua, gestionarla adecuadamente antes de su descarga al medio ambiente, previniendo así, las inundaciones que se puedan producir por la escorrentía pluvial (Constructed waterway design manual | Melbourne Water, s. f.).

Figura 26

Manual de Drenaje Urbano Sostenible de Melbourne Water

TABLE OF CONTENT

ACRONYMS AND ABBREVIATIONS	4
INTRODUCTION TO THE MANUAL	6
Purpose of the manual.....	6
How to use the manual.....	7
PART A: VISION, OUTCOMES AND CRITERIA	8
A1. DESIGN CONTEXT	9
A2. VISION	10
A2.1 Healthy Waterway Strategy Vision	10
A2.2 Project (Site or Place) Vision	10
A3. DESIGN OUTCOMES AND OBJECTIVES	11
A3.1 Asset protection	12
A3.2 Amenities	13
A3.3 Community Connection	14
A3.4 Native flora and fauna	14
A3.5 Asset Management	15
A3.6 Design criteria	16
PART B: DESIGN APPROACH AND FUNDAMENTALS.....	17
B1. DESIGN APPROACH.....	18
B1.1 Design stages	18
B1.2 The threshold waterway design method	18
B1.3 Waterway design tools	21
B1.4 Waterway design inputs	21
B1.5 Waterway design outputs	21
B2. WATERWAY DESIGN FUNDAMENTALS.....	22
B2.1 Hydrology and hydraulics	22
B2.2 Physical form, processes and stability	29
B2.3 Ecological values in waterways	39
B2.4 Social Values	43
PART C: DESIGN ACCEPTANCE PROCESS AND DEEMED TO COMPLY.....	46
C1. DESIGN ACCEPTANCE APPROACH	47
C1.1 Design acceptance options	49
C1.2 Working with Melbourne Water	50
C2. CONCEPT DESIGN STAGE	52
C3. FUNCTIONAL DESIGN STAGE	57
C4. DETAILED DESIGN STAGE	61
C5. PRE-CONSTRUCTION STAGE	64
C6. AS-CONSTRUCTED AND ESTABLISHMENT STAGE	67
C7. DEEMED TO COMPLY	71
C7.1 Introduction	71
C7.2 Deemed to Comply criteria.....	71

Nota. Índice general del Manual de SUDS aplicado en Australia. (Constructed waterway design manual | Melbourne Water, s. f.)

3.3 Reino Unido

El Reino Unido brinda varias guías técnicas relevantes que respaldan su posición frente al Cambio climático, ambiental y que facilitan el cumplimiento normativo de los proyectos mediante las nuevas estrategias de drenaje.

CIRIA SuDS Manual (C753) es clave para la propuesta de la infraestructura de drenaje ecológico, ejecución y respectivo cuidado de la misma, al proporcionar puntos importantes como

sus principios técnicos, recomendaciones y beneficios adicionales (Construction Industry Research and Information Association [CIRIA], 2015).

Site Handbook for the Construction of SuDS (C698) CIRIA resalta la importancia de integrar al principio de cada proyecto prácticas que apunten a la construcción sostenible y lo demuestra al orientar mediante este capítulo que está pensado para los profesionales de obra (Construction Industry Research and Information Association [CIRIA], 2007).

Planning Policy Stament 25 es un documento técnico que da las directrices acerca del desarrollo urbano mediante la integración de los SUDS y cumplir estándares competentes no obligatorios (Planning Practice Guidance, 2019).

3.4 España

En España ha surgido una demanda creciente con los aspectos de la regulación sostenible de esta fuente hídrica, llevando a plantear así ciertas normativas relacionadas con los SUDS. Algunas de estas se mencionan a continuación:

“Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el Término Municipal de Murcia” que contiene principios organizativos, beneficios, diferentes medidas (estructurales y no estructurales), procesos de mantenimiento y marco regulatorio aplicable, generando soluciones sostenibles que integran naturaleza e infraestructura para crear entornos urbanos más resilientes (Blanco et al., 2023).

“Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres” incluye ejemplos prácticos y un proceso de diseño que prioriza la sostenibilidad en España y el extranjero, la mejora del entorno urbano y el cumplimiento de normativas internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Checa & Pazos, 2018).

“Guía de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible” brinda estrategias para mitigar inundaciones y sus consecuencias, analiza dificultades urbanas como la impermeabilización del suelo y establece alternativas sostenibles de almacenamiento, infiltración y control de origen. Así, incluye criterios de diseño, mantenimiento y casos prácticos que ilustran su aplicación en diferentes contextos urbanos en España (Ministerio para la transición ecológica del Gobierno de España, 2019).

3.5 Países Bajos

Los países bajos dada su ubicación geográfica, se han convertido en pioneros de la gestión del agua, por lo que han desarrollado marcos normativos clave con el mismo fin, promoviendo practicas alineadas a los principios en los SUDS.

Nationaal Water Programma 2022 – 2027 es un programa que engloba temas como la calidad del agua y adaptación al cambio climático, además, establece las directrices para la política hídrica del país y su respectiva gestión. Se fomenta la integración en el manejo de agua pluvial, la IG y la resiliencia urbana (Waterstaat, 2022).

Nationaal Bestuursakkoord Water las autoridades holandesas crearon un convenio con el objetivo de mejorar la conservación del medio hídrico. Se aplican prácticas que optimizan la administración de aguas pluviales y la infraestructura urbanas, lo que facilitan la adopción de soluciones sostenibles en el drenaje urbano. Basándose así en la colaboración interinstitucional entre diferentes niveles de gobierno, claridad en las responsabilidades y la implementación de medidas costo – efectivas enfatizadas en la necesidad de adaptar las infraestructuras urbanas al cambio climático, objetivo central de los SUDS (Gobierno Nacional et al., 2003).

3.6 Alemania

En este país del primer mundo se encuentra el **Wasserhaushaltsgesetz (WHG)**, que es el encargado de regular y optimizar el control del agua implementando medidas sostenibles, los cuales incluyen aspectos relacionados con el manejo de áreas verdes y la conservación del recurso hídrico (Senge, 2022).

Los enfoques que contribuyen a la aplicación de las practicas sostenibles se pueden resumir en algunos puntos clave como lo son: Protección de cuerpos de Agua, Gestión de zonas de captación de aguas y Gestión de inundaciones y uso del suelo. De esta manera el WHG establece requisitos para la gestión de áreas de captación de agua potable, con medidas preventivas y correctivas, como los permisos necesarios para poder intervenir en cuerpos de agua, asegurándose de minimizar los impactos ambientales y la cantidad de agua disponible para diferentes usos, con esas directrices se restringe el desarrollo de las inundaciones mediante el uso de técnicas de IG y planificación urbana adecuada (Senge, 2022).

3.7 Francia

Francia para poder abordar los desafíos relacionados con la gestión de aguas pluviales implementa los SUDS, buscando solucionar esta problemática, especialmente en entornos densamente poblados como lo es Île-de-France. Por esta razón, propone el *Élaboration et instruction des dossiers relatifs à la gestion et aux rejets des eaux pluviales* mediante la **Guide technique francilien**, asegurando la reutilización de aguas pluviales y la protección de bienes y personas, donde resalta el diseño de proyectos compatibles con normativas locales. Así, se solicita una planificación temprana y una coordinación con las autoridades locales con el fin de garantizar el cumplimiento regulatorio y optimizar el impacto ambiental y social (Saussaie, 2020).

Del mismo modo, se basa en la **Directiva Europea Marco de Agua (Directiva 2000/60/CE)** y lo ajusta a su reglamentación nacional. Esta directiva establece un marco donde se consolida la protección de las aguas promoviendo un enfoque integrado incluyendo estrategias como los SUDS para elevar la salubridad y gestionar el recurso hídrico adecuadamente (Parlamento Europeo, 2000).

3.8 Estados Unidos

Este abarca marcos regulatorios como “**EPA Stormwater Management Guidelines**” en el que se destacan los Low Impact Development (LID) para la gestión del escurrimiento. Mediante herramientas para determinar condiciones de implementación de las soluciones como la “BMP Siting Tool”, que se basa en las características del terreno y necesidades Hídricas (Environmental Protection Agency, US EPA, 2015).

Con esto se tratarían las buenas prácticas de manejo (BMP), que, a través de soluciones adaptadas a las condiciones mencionadas anteriormente, da estrategias para minimizar el volumen, velocidad del agua, descarga y mejora de sus características tratando de imitar los procesos hidrológicos naturales gracias a sus sistemas como lo son: jardines de lluvia, techos verdes, pavimentos permeables, etc (Washington State Department of Ecology, 2024).

Figura 27

EPA Stormwater Management Guidelines

CONTENTS

Acknowledgments	v
LID Maintenance Advisory Committee.....	v
LID Maintenance Administrative Issues Advisory Committee	v
Introduction	1
Purpose	1
Ecology Requirements for LID BMP Maintenance	1
Phase I Permit Special Conditions	2
Phase II Permit Special Conditions	3
Summary	4
How to Use this Guidance Document.....	5
Maintaining LID BMPs Section.....	5
Programmatic and Administrative Guidance Section	5
Definitions/Acronyms.....	6
Maintaining LID BMPs.....	9
All LID BMPs	11
Maintenance Standards and Procedures	11
Equipment and Materials.....	13
Skills	13
Bioretention Facilities.....	15
Key Maintenance Considerations.....	15
Key Operations to Preserve Facility Function.....	16
Maintenance Standards and Procedures	16
Additional Maintenance Resources	29
Equipment and Materials.....	30
Skills and Staffing	31
Rain Gardens.....	33
Key Maintenance Considerations.....	33
Key Operations to Preserve Facility Function.....	33
Maintenance Standards and Procedures	33
Additional Maintenance Resources	39
Equipment and Materials.....	39
Permeable Pavement	41
Key Maintenance Considerations.....	41
Key Operations to Preserve Facility Function.....	42
Maintenance Standards and Procedures	43
Equipment and Materials.....	53
Skills and Staffing	54
Vegetated Roofs.....	57
Key Maintenance Considerations.....	57

Nota. Contenido de los marcos regulatorios establecidos en Estados Unidos. (Washington State Department of Ecology, 2024)

3.9 Canadá

El gobierno canadiense en pro del desarrollo urbano sostenible ha desarrollado enfoques para satisfacer metas ambientales en políticas públicas, buscando mejorar el acopio de los recursos hídricos y reducir la contaminación presente en el mismo, por medio del **“Toronto, s Wet Weather Flow Master Plan”** que otorga directrices para el uso de tecnologías en busca de la sostenibilidad y avance de evaluaciones nacionales para la toma de decisiones resilientes, al incluir estructuras adaptadas al cambio climático para mitigar el impacto ambiental (Employment and Social Development Canada, ESDC, 2023).

Además de esto, existe una **Guía elaborada por Credit Valley Conservation y Toronto and Region Conservation Authority**, con un enfoque de LID. Se evidencian estrategias disminuyendo impactos negativos del escurrimiento pluvial, tales como infiltración, evapotranspiración, recolección y detención de agua cerca de su origen (Toronto and Region Conservation Authority, 2010).

3.10 San Salvador

Este país busca implementar los SUDS con el fin de abordar un cambio en el paradigma hacia una gestión sostenible e integral del agua pluvial y es por ello que establece la **Guía técnica para el diseño de los mismos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)**. Este esfuerzo es respaldado por organizaciones internacionales como la Unión Europea, para

reducir los riesgos y costos generados por las inundaciones (Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador, COAMSS, 2021).

Además de esto, San Salvador plantea la **Ley General de Recursos Hídricos** vigente desde el 13 de julio de 2022. El principal objetivo de la ley es gestionar integralmente el agua, de manera que mediante su uso se preserve este recurso para que las generaciones futuras tengan acceso al mismo garantizando su calidad. Los aspectos más relevantes de sostenibilidad de los que hace énfasis son la mitigación del cambio climático, la educación y sensibilización ambiental, la preservación de los ecosistemas y la participación ciudadana (Gobierno del Salvador, 2013).

3.11 Chile

El Ministerio de Medio Ambiente en Chile presenta la “**Guía de Diseño de Infraestructura Verde**”, que incluye a los SUDS como parte de una infraestructura verde y resalta la importancia de los mismos, con el fin de brindar soluciones basadas en la naturaleza, como biofiltros, humedales artificiales que mejorarían el uso eficiente de las aguas y de esta manera, maximizar la resiliencia de las áreas urbanas, mediante la integración de dichas tecnologías sostenibles (Labra & Fehr, 2024).

3.12 Brasil

Como en otros países, se busca el garantizar el uso del agua de manera sostenible y Brasil no es la excepción, con su “**Ley N° 9.433 de 1997**”, la cual es conocida como la ley del agua en Brasil, que reconoce el agua como un bien económico al integrar la gestión de la calidad y

calidad del recurso. Esta establece el plan hidrológico nacional y de tal manera, desarrolla un Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos. Estos instrumentos establecidos incluyen los planes de recursos hídricos, la concesión de derechos de uso y la implementación de cobros por su utilización (Congreso Nacional, 1997).

Brasil cuenta además con la Resolución “**CONAMA N°430 de 2011**” que establece los estándares, parámetros y condiciones para que se pueda realizar descargas de efluentes en cuerpos de agua receptores, con el fin de garantizar el uso sostenible y proteger la calidad del agua. Esta modifica la **Resolución N° 357 de 2005** del Consejo Nacional del Medio Ambiente (Consejo Nacional para el Medio Ambiente, CONAMA, 2011).

La implementación de los SUDS respaldadas en las leyes y resoluciones, contribuye al cumplimiento de los objetivos establecidos previamente, mejorando de esta manera la administración de las aguas pluviales urbanas y reduciendo así la contaminación de los cuerpos de agua.

3.13 Colombia

En este país se cuenta con algunos decretos y leyes las cuales abarcan la construcción sostenible, los lineamientos para el diseño de los SUDS y el cumplimiento de algunas normas técnicas.

Decreto 1077 de 2015, Título 7 en la segunda parte del Libro 2, establece directrices sobre la gestión ambiental en el uso adecuado de los recursos naturales y en Construcción Sostenible (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015).

Decreto 597 de 2018, en el cual es establecido en el Distrito Capital el Sistema de Drenaje Pluvial Sostenible, donde se constituyen sus capítulos de administración, coordinación, dirección y se precisan disposiciones y parámetros para su respectivo funcionamiento (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018).

Se cuenta, además, con una **Guía que engloba los lineamientos para el diseño de los SUDS, por parte del Departamento Nacional de Planeación y Minambiente**, en el cual se presenta un Proyecto Tipo donde se da orientación básica en cuanto a la sostenibilidad del proyecto, procedimiento constructivo y análisis del presupuesto (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Por otro lado, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio ha propuesto una **Guía metodológica para la formulación e implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible**. Este incluye clasificaciones y tipologías SUDS según sus objetivos, ya sea de regular la cantidad de agua, mejorar la calidad de la misma o preservar la biodiversidad. Así, está diseñada para mitigar los impactos negativos acerca del ciclo hidrológico natural (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

Adicionalmente a lo mencionado con anterioridad, la ciudad de Bogotá cuenta con un documento técnico de soporte que enfatiza su aplicación en proyectos urbanos como el POZ Norte en Bogotá, integrándolos en planes de ordenamiento territorial para fomentar la sostenibilidad ambiental y social (Secretaría Distrital de Planeación, 2021).

Finalmente, una vez estudiadas las regulaciones de los SUDS a nivel mundial, cabe resaltar que cada normativa es única y aplicada para cada país en específico y que la posibilidad de replicarla internacionalmente solo sirve de base conceptual, puesto que hay que considerar diversas condiciones variables al momento de la práctica, como las referentes al clima, al tipo de urbanización (formal e informal), a su nivel de desarrollo legal y a la capacidad de financiamiento. En la siguiente tabla se destacan a detalle cada uno de los factores influyentes.

Tabla 2*Normativa de SUDS por país*

País	Normativa	Objeto	Aplicabilidad	Fuente
China	Especificaciones técnicas para la construcción de infraestructuras de ciudades esponja (CJJ/T 245-2016)	Incorporar criterios de sistemas verdes urbanos, a través de estrategias que enfatizan la importancia de manejar el agua sosteniblemente, llevando a la conexión con el enfoque de las ciudades esponja.	Su normativa está influenciada por el nivel de desarrollo de China, con un financiamiento centralizado y un estricto dominio del Estado. No replicable a países en desarrollo con presupuestos limitados.	(Ministry of Housing and Urban-Rural Development, MOHURD, 2016)
Australia	Manual de Drenaje Urbano Sostenible de Melbourne Water	Mejorar la calidad del agua, gestionarla adecuadamente antes de su descarga al medio ambiente, previniendo así, las inundaciones que se puedan producir por la escorrentía pluvial.	El Manual está diseñado para climas secos a templados, con un firme compromiso en el cuidado del agua. Podría aplicarse en países con un clima similar y una planificación formal.	(Constructed waterway design manual Melbourne Water, s. f.).

País	Normativa	Objeto	Aplicabilidad	Fuente
Reino Unido	CIRIA SuDS Manual (C753) Site Handbook for the Construction of SuDS (C698) Planning Policy Stament 25	Respaldar su posición frente al Cambio climático, facilitando el cumplimiento normativo de los proyectos mediante las nuevas estrategias de drenaje.	Sus regulaciones son un referente internacional debido a su estructura organizativa desde el diseño, construcción y mantenimiento. Sin embargo, es necesario adaptar el modelo al clima y condiciones locales.	(Construction Industry Research and Information Association, CIRIA, 2015) (Construction Industry Research and Information Association, CIRIA, 2007) (Planning Practice Guidance, 2019)
España	Guía básica de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el Término Municipal de Murcia Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas	Generar soluciones sostenibles que integran naturaleza e infraestructura verde para crear entornos urbanos más resilientes.	Estas guías responden a un clima entre seco y húmedo, adaptable a países mediterráneos considerando que presenten condiciones similares.	(Blanco et al., 2023) (Checa & Pazos, 2018) (Ministerio para la transición ecológica del Gobierno de España, 2019).

País	Normativa	Objeto	Aplicabilidad	Fuente
	Verdes y otros Espacios Libres			
	Guía de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible			
Países Bajos	Nationaal Water Programma 2022 – 2027 Nationaal Bestuursakkoord Water	Ser pioneros de la gestión del agua, por lo que han desarrollado marcos normativos clave con el mismo fin, promoviendo practicas alineadas a los principios en los SUDS.	Este país cuenta con una topografía baja, propensa a inundaciones, por lo que sus normativas de gestión del agua son bastante exclusivas, difícil de replicar.	(Waterstaat, 2022) (Gobierno Nacional et al., 2003)
Alemania	Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	Regular y optimizar el control del agua implementando medidas sostenibles, los cuales incluyen aspectos relacionados con el manejo de áreas verdes y la	Debido a que Alemania consta de una base legal desarrollada, exige que los países que pretendan seguir sus pasos cuenten con firmes regulaciones similares.	(Senge, 2022)

País	Normativa	Objeto	Aplicabilidad	Fuente
		conservación del recurso hídrico.		
Francia	Guide technique francilien Directiva Europea Marco de Agua (Directiva 2000/60/CE)	Solicitar una planificación temprana y una coordinación con las autoridades locales con el fin de garantizar el cumplimiento regulatorio y optimizar el impacto ambiental y social.	Sus regulaciones inspiran reformas a nivel internacional, pero requieren de ajustes institucionales.	(Sausaie, 2020) (Parlamento Europeo, 2000).
Estados Unidos	EPA Stormwater Management Guidelines	Dar estrategias para minimizar el volumen, velocidad del agua, descarga y mejora de sus características tratando de imitar los procesos hidrológicos naturales.	Dado su estructura normativa, se hace necesario un alto cumplimiento ambiental y recursos para IG, lo que incentiva su aplicabilidad en proyectos privados pero limita a países con urbanización no regulada.	(Environmental Protection Agency, US EPA, 2015) (Washington State Department of Ecology, 2024).
Canadá	Toronto, s Wet Weather Flow Master Plan	Desarrollar enfoques para satisfacer metas	Enfocados en la urbanización densa de	(Employment and Social Development

País	Normativa	Objeto	Aplicabilidad	Fuente
San Salvador	Guía elaborada por Credit Valley	ambientales en políticas públicas, buscando	Toronto, estas guías pueden ser replicadas donde existan	Canada, ESDC, 2023)
	Conservation y Toronto and Region Conservation Authority	mejorar el acopio de los recursos hídricos y reducir la contaminación.	los recursos disponibles y una alta planificación ambiental.	(Toronto and Region Conservation Authority, 2010)
	Guía técnica para el diseño de los mismos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)	Implementar los SUDS con el fin de abordar un cambio en el paradigma hacia una gestión	Sus regulaciones son un referente para ciudades latinoamericanas con un desarrollo urbano no	(Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador,
	Ley General de Recursos Hídricos	sostenible e integral del agua pluvial.	planificado y recursos limitados.	COAMSS, 2021) (Gobierno del Salvador, 2013)
Chile	Guía de Diseño de Infraestructura Verde	Brindar soluciones basadas en la naturaleza, que mejorarían el uso eficiente de las aguas y maximizarían la resiliencia de las áreas urbanas.	Su guía es útil para países de América Latina con geografía y clima similar.	(Labra & Fehr, 2024)
Brasil	Ley N° 9.433 de 1997 CONAMA N°430 de 2011	Contribuir a la administración de las aguas pluviales urbanas y	Aunque sus normativas no pueden ser aplicadas directamente a nivel	(Congreso Nacional, 1997)

País	Normativa	Objeto	Aplicabilidad	Fuente
		a la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua.	internacional, sí se podría adecuar su enfoque de gobernanza con el suficiente apoyo técnico e institucional.	(Consejo Nacional para el Medio Ambiente, CONAMA, 2011)
Colombia	Decreto 1077 de 2015 Decreto 597 de 2018 Guía que engloba los lineamientos para el diseño de los SUDS, por parte del Departamento Nacional de Planeación y Minambiente Guía metodológica para la formulación e implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible Documento técnico de soporte-Bogotá	Gestionar adecuadamente los recursos naturales, mitigando los impactos negativos del ciclo hidrológico natural.	Sus decretos son aplicables únicamente en Colombia debido a su sistema de planificación nacional. Sin embargo, las guías que presenta pueden ser replicadas a contextos similares en Latinoamérica.	(Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015) (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018) (Departamento Nacional de Planeación, 2018) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022) (Secretaría Distrital de Planeación, 2021)

Capítulo 4: Ciudades esponja alrededor del mundo

Las ciudades a nivel mundial actualmente afrontan problemáticas de gran complejidad, de índole ambiental y social. La alteración profunda del ciclo hidrológico original, que reduce las propiedades del suelo e incrementa el coeficiente del flujo de agua sobre la superficie, donde se evidencia las zonas urbanas impermeabilizadas que sustituyen los paisajes naturales. En consecuencia, de lo mencionado con anterioridad, se ha aumentado la frecuencia e intensidad de fenómenos hidrometeorológicos como lo son los anegamientos súbitos, el déficit hídrico prolongado y el deterioro de la calidad del agua (Senge, 2022).

Dado estos sucesos extremos, ha expuesto la ineficiente funcionalidad de los sistemas urbanos convencionales ante este tipo de situaciones de variabilidad climática, generando vulnerabilidad territorial, impactos adversos tanto en la integridad funcional de los sistemas ecosistémicos urbanos como en la calidad de vida poblacional y un significativo deterioro global de la biodiversidad. La infraestructura tradicional, resulta limitante en la mitigación de las inundaciones y sequías, además de facilitar la degradación del ecosistema urbano, todo esto debido a su diseño con un enfoque orientado a la rápida eliminación del excedente hídrico (Senge, 2022).

En respuesta a esta crisis global, se ha empezado a repensar la relación de las ciudades con el agua y el desarrollo urbano. Así pues, distintas urbes han estado aplicando un modelo de regulación hídrica integrada, basado en criterios de hidrología sostenible, conocido como

“Ciudad Esponja”. Este enfoque, por medio de herramientas tecnológicas versátiles, maximiza el rendimiento para captar, conservar, depurar y reaprovechar este recurso vital (Senge, 2022).

El modelo mencionado ha sido adoptado en contextos geográficos específicos, dependiendo las necesidades presentes en cada entorno. De esta manera, se han enfrentado situaciones que han llevado a los distintos gobiernos a desarrollar estrategias que adopten redes de áreas verdes, al integrar infraestructuras flexibles y espacios multifuncionales, reconvirtiendo espacios públicos mediante soluciones de absorción y purificación ecológica. Todo esto, con el fin de recuperar el ciclo hidrológico urbano (Senge, 2022).

Este capítulo abordará diferentes casos de estudio a nivel mundial, analizando las condiciones climáticas y geográficas de cada escenario. Se expondrán los motivos que han impulsado la ejecución del modelo de ciudad esponja en cada uno de estos y los beneficios que han obtenido luego de la aplicación del mismo.

Los casos de estudio se emplean para recopilar, interpretar y evaluar información práctica mediante un análisis exhaustivo acerca de un tema, una situación o un problema en específico. Este enfoque aplicado en las ciudades esponja permite examinar y estimar qué tan eficientes resultan las soluciones desarrolladas en gestión de recursos, áreas de infraestructura y adaptabilidad climática (Zhang et al., 2019).

Además, estos estudios brindan la posibilidad de constituir lineamientos técnicos y metodologías efectivas para la planificación urbana aportando puntos clave para la escalabilidad y replicabilidad de estas estrategias basadas en la naturaleza en distintos entornos urbanos. Esto

facilita el diseño de políticas públicas, fomentando modelos de desarrollo urbano resiliente y sostenible que influyen en la disminución de la isla de calor (Zhang et al., 2019).

A continuación, se expone el país más relevante que ha tomado esta iniciativa:

4.1 China

La República Popular China ha emergido como referente mundial en la planificación territorial diseñada al fortalecimiento de los procesos hidrológicos en regiones de alta densidad urbana mediante la puesta en marcha del concepto de “Ciudad Esponja”. De este modo, desde el año 2015 dicho país lanzó su programa de proyectos piloto que abarcan ciertas ciudades, con una inversión inicial cerca de 12.000 millones de dólares (Zeng et al., 2023).

Inicialmente se seleccionó en este año un grupo de 16 ciudades, priorizando la expansión demográfica, la vulnerabilidad a inundaciones, la variabilidad climática y el compromiso de los gobiernos locales para llevar a cabo la IG de una forma sostenible, facilitando la aplicabilidad del modelo y garantizando su factibilidad a largo plazo. Posteriormente, en el año 2016 se expandió esta iniciativa a 14 centros urbanizados, para un total de 30 proyectos piloto, destacándose lugares como Zhengzhou, Pingxiang, Beijing, Fengxi y Xi'an, en los que se evidencia la optimización del recurso hídrico a partir de esta estrategia innovadora (Zeng et al., 2023).

Mencionado lo anterior, se detallan estas ciudades de China:

4.1.1 Zhengzhou

El riesgo de inundaciones es mucho mayor en regiones cercanas a ríos, propensas a fuertes lluvias estacionales, como es el caso de Zhengzhou. Esta se sitúa en el centro de China,

siendo capital de la provincia de Henan, con una población aproximada de doce millones de habitantes y una superficie de 167.000 kilómetros cuadrados (Karnicar, 2024).

Zhengzhou se ha visto afectada por una serie fuerte de inundaciones, principalmente en los meses de junio, julio y agosto, debido a que por la misma pasa el río Yangtze y dado su clima monzónico que ofrece una precipitación anual cerca de 600mm. Estas acciones combinadas con la construcción insuficiente de las represas, han generado preocupación de posibles terremotos o nuevos extremos hídricos (Karnicar, 2024).

Sumado a lo anterior, esta no cuenta con un terreno óptimo dado su baja capacidad de infiltración, lo que conduce a un incremento en la velocidad de la escorrentía e impide que se recuperen las fuentes hídricas, ya que el agua pluvial no llega a los acuíferos subterráneos. Además de estos factores, las pruebas de los sistemas de drenaje y tuberías presentes en la infraestructura son deficientes (Karnicar, 2024).

En consecuencia, Zhengzhou fue considerada como parte de los proyectos pilotos de este país, en vista de que se localiza en una zona donde los factores humanos complicaron en gran medida los peligros naturales en relación a eventos extremos de precipitación. En este contexto, su designación dentro del programa “ciudades esponja” implica un avance estratégico en el ámbito de investigación y desarrollo, y representa una acción potencialmente crucial para la recuperación y adaptación frente a futuras crisis hídricas (Karnicar, 2024).

Por estos motivos, en el año 2016 se cubrieron 1945 kilómetros cuadrados con una inversión de más de 50.000 millones de yuanes, los cuales fueron distribuidos en diversas

soluciones sostenibles. Se construyeron más de 191 canales de inundación que dirigieran la escorrentía de manera controlada ayudando a la mitigación de la acumulación de agua, ya que estos incorporaban materiales permeables, diseñados bajo pendientes y secciones específicas, incluyendo en ocasiones compuertas para dichas funciones (Karnicar, 2024).

Se instalaron áreas de detención para retener el agua temporalmente en épocas de lluvias intensas, se tuvo en cuenta pendientes y la selección de vegetación, así como los sistemas de drenaje para liberar de forma gradual el agua retenida. Sumado a esto, desarrollaron depósitos de aguas pluviales y residuales con el fin de filtrar las mismas y eliminar sus sedimentos. Algunos cuentan con tecnologías de infiltración para recargar los acuíferos subterráneos y procesos de tratamiento a diferentes escalas lo que permite que el agua sea purificada y reutilizada (Karnicar, 2024).

Por otra parte, se ejecutó un proyecto de revitalización, rehabilitando los espacios urbanos deteriorados mediante parques con suelos permeables, generando corredores ecológicos que fomentan la biodiversidad e incorporando techos y muros verdes en las edificaciones. Esto, en la búsqueda constante de brindar un entorno más seguro y agradable, especialmente en lugares de densidad considerable como Zhengzhou (Karnicar, 2024).

La materialización del concepto de ciudad esponja en esta parte de China fue uno de los más ambiciosos y su resultado fue realmente un logro, ya que esta se adaptó de una manera práctica a los patrones de lluvia. Así, se evidenció beneficios significativos al eliminar 125 puntos de riesgo propensos a estancamientos de agua, reduciéndolos en un 77% además de

reciclar este recurso, logrando transportar 380 millones de toneladas del mismo; permitiendo que la región de la llanura de inundación original tuviera una recuperación o equilibrio con la naturaleza (Karnicar, 2024).

4.1.2 Pingxiang

La ciudad de Pingxiang, provincia de Jiangxi, siendo el primer proyecto piloto de China, cuenta con un clima monzónico subtropical típico, una temperatura media anual de 17,3°C y una precipitación por año relevante cerca de los 1596,7mm. Además, para el año 2015, la población de la misma estuvo alrededor de los 1,93 millones de habitantes con una superficie de aproximadamente 3.827 kilómetros cuadrados (Han & Wu, 2019).

Los motivos de su elección como parte de esta importante estrategia se deben a diversos factores, uno de ellos es la concentración de la mayor parte de la población en la zona central de Pingxiang, lo que genera la presencia de las empresas industriales y mineras y, por ende, una demanda hídrica elevada (Han & Wu, 2019). Sin embargo, el suelo arcilloso predomina en la ciudad, por lo que la permeabilidad de agua pluvial es realmente escasa (Men et al., 2020).

Sumado a esto, Pingxiang presenta problemas de precipitación desigual, así que, el agua lluvia en los meses de abril a junio corresponde a un 44,5% anual y el consumo de agua solo representa el 20% de todo el año. El conflicto está en el período de julio a septiembre, cuando las precipitaciones son del 20% y la demanda de agua es del 70% del consumo anual, situación que refleja, como en el caso de la zona central, la escasez hídrica en términos no solo de la cantidad

del recurso, sino también de la calidad e infraestructura acorde para su gestión (Han & Wu, 2019).

Por otra parte, el terreno en esta urbe de China se caracteriza por ser montañosa, por lo que en épocas de lluvia extrema se presenta una rápida escorrentía superficial hacia las áreas urbanas mediante el río Pingshui, produciéndose un incremento significativo en el caudal del sistema de drenaje y colocando en riesgo la capacidad hidráulica de la red existente debido a la profundidad de inundación que oscila entre los 50 y 120cm. Un claro ejemplo de esto, es la bahía de Wanlong, donde ha ocurrido un progresivo anegamiento urbano de aproximadamente 30 kilómetros cuadrados, resultado de la acumulación recurrente de agua pluvial (Han & Wu, 2019).

A causa de lo mencionado anteriormente, se optó por darle solución a esta necesidad urgente de Pingxiang. En primer lugar, dentro de la nueva expansión urbana, se incorporaron instalaciones como pavimentos permeables y techos verdes con sistemas avanzados para facilitar la captura, así como la infiltración y depuración del recurso hídrico. Posteriormente, se tomaron medidas en los parques y espacios verdes, creando biojardines y cinturones ecológicos a manera de amortiguación natural, con el fin de regularizar el agua lluvia (Wang et al.,2018).

Para complementar estas acciones, se realizó la construcción de áreas de almacenamiento de agua regulada y estaciones de bombeo, con el objetivo de intensificar la eficiencia de evacuación, especialmente en momentos de precipitaciones extremas. Además de esto, se planteó llevar a cabo un mantenimiento constante para garantizar la eliminación de los contaminantes del agua retenida, antes de ser conducidas hacia un depósito de almacenamiento o tratamiento posterior (Wang et al.,2018).

Finalmente, se integraron cinturones verdes cóncavos y jardines de lluvia descentralizados en todas las vías urbanas, diseñados para recopilar, filtrar y reacondicionar el medio hídrico, fomentando la ecología y sostenibilidad. Así mismo, para la construcción de dichas vías incluidas las aceras, se emplearon materiales de pavimentación con un rendimiento de drenaje óptimo, mejorando su capacidad (Wang et al.,2018).

De esta manera, el proyecto de ciudad esponja en Piangxiang logró mejorar diversos ámbitos como la eliminación de los contaminantes en los ríos y mejora en la calidad del recurso hídrico, con una tasa superior al 50%. Gracias a esto, se aprovechó el agua considerablemente, siendo utilizada para labores como paisajismo, limpieza y riego de plantas verdes, logrando un ahorro anual de cerca de 2 millones 560 mil toneladas (Han & Wu, 2019).

Del mismo modo, la tasa de control de escorrentía anual pasó del 30% a más del 75% en esta zona piloto, disminuyendo los impactos negativos y contribuyendo a la diversidad de vegetación acuática. Así, se mitigó con éxito 49 puntos vulnerables de acumulación de agua, reduciendo el riesgo del anegamiento urbano y protegiendo 43 bloques residenciales expuestos con anterioridad a inundaciones (Han & Wu, 2019).

4.1.3 Beijing

El sector de análisis, ubicada en el distrito en Tongzhou, Beijing, al Noreste de China, siendo la capital del gigante asiático. Abarca una superficie de 84.09 ha con un 51.06 ha de superficie impermeable, en su gran mayoría edificaciones y vías de comunicación además de

zonas residenciales que generan una elevada escorrentía superficial. El clima presente en esta región es monzónico continental templado, promediando una temperatura anual de 14.6°C y una precipitación media por año de 535.9mm, donde el mayor período de lluvia se da de junio hasta agosto aportando más del 80% de la precipitación de la zona (Gong et al., 2019).

En base a sus condiciones, en sus inicios se diseñó con una red de alcantarillado la cual opera como un sistema de alcantarillado combinado, lo que ha llevado al incremento de la contaminación por desbordamientos (CSO) a lo largo de los años. La infraestructura de drenaje en Beijing está comprendida por plantas de tratamiento de agua, contando con 1108 de estas, de las cuales 58 trabajan procesando 3.735 millones de m³/día dentro del área urbana. Extendiendo su red pública de drenaje hasta los 11,619.88 kilómetros y para aguas pluviales cuenta con unas 133 estaciones para el bombeo de las mismas, con una red de tuberías que se extiende a lo largo de 4,230.20 kilómetros (Gong et al., 2019).

Debido a esto, el gobierno ha invertido en investigaciones para definir medidas en pro del rendimiento del drenaje urbano, para reducir así, el impacto por anegamientos. Beijing cuenta con unos buenos proyectos para la prevención de inundaciones, en los que incluye, zonas de contención, embalses, ríos y diques. Sumado a lo anterior, se realizó un estudio sobre mapas de riesgo de afluencias excesivas de agua, los cuales sirven para especificar la vulnerabilidad de algunas zonas e implementar medidas de ingeniería para mitigar estos desastres y concientizar a la ciudadanía sobre la importancia de esta problemática (Zhang et al., 2018).

Como primera ciudad en adoptar este tipo de estrategias, fue escogida en la primera camada de ciudades piloto del programa chino de ciudades esponja, donde se implementaron distintos tipos de LID, tales como pavimentos permeables, techos verdes, jardines de lluvia, bioretención y zanjas de infiltración. Garantizando que al menos el 50% de dichos espacios verdes estén diseñados con depresiones naturales, en canto a las áreas residenciales, estacionamientos, aceras y plazas el 70% del pavimento debe ser permeable, en conjunto a la incorporación de los jardines de lluvia y humedales artificiales para la retención de agua, brindando una mejor capacidad de absorción del agua, mejorando su calidad y almacenamiento (Gong et al., 2019).

Con la estructura anteriormente establecida, los resultados obtenidos demuestran el acierto por parte de las entidades a cargo del proyecto piloto. Estos resultados van desde la reducción de desbordamientos anuales del 41%, reducción de los CSO desde un 10 a un 26% hasta la reducción del volumen de escorrentía en un 44.13%. La experiencia de Beijing se ha convertido en un referente global en el ámbito de la planificación urbana de manera sostenible, exponiendo lo clave que es enfrentar los desafíos del cambio climático, con la combinación de la IG y tecnología avanzada para favorecer a la expansión urbana (Gong et al., 2019).

4.1.4 Fengxi

Fengxi es un condado ubicado en el centro de la provincia de Shaanxi, en el norte de China, esta desempeña un papel importante, siendo en el Nuevo Distrito de Xixian un componente integral a nivel estatal por su relieve montañoso en la que se presentan yacimientos minerales. Esta cuenta con un clima templado monzónico semiárido con una variación térmica

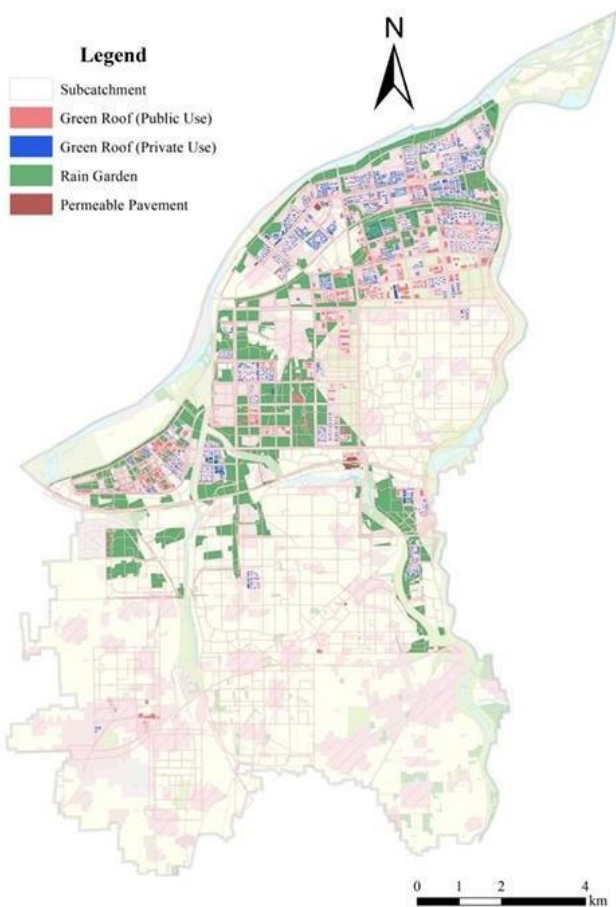
significativa, presentando precipitaciones anuales de alrededor de 520mm, promediando en el periodo de junio a septiembre el 50% de ellas; las cuales se extienden por la superficie de 880km² aproximadamente que cuenta esta región (Mao et al., 2024).

Dado el fuerte periodo de lluvia que se evidencian, es importante mencionar que las lluvias se presentan principalmente como tormentas, las cuales pueden generar fenómenos que causan daños adversos como crecidas de ríos, desgaste del suelo y acumulación de agua en terrenos bajos. Por este motivo el distrito goza del prestigio de ser una ciudad esponja piloto, destacándose en el año 2019 con un reconocimiento por parte de la UNESCO que la pone como un sitio de demostración global de ecohidrología por su buen papel desempeñado (Mao et al., 2024).

Dentro del área de estudio, se introdujeron tres tipos de IG escogidos por factores de idoneidad dadas las condiciones de la urbe, los cuales fueron: Techos verdes, jardines de lluvia, pavimentos y aceras permeables, las cuales fueron instalados idealmente en áreas de vulnerabilidad por parte del impacto climático. Contando con variaciones en cuanto a demanda de espacio para los usuarios, costo – efectividad y eficacia del tratamiento (Mao et al., 2024).

Figura 28

Localización de los sistemas aplicados en Fengxi



Nota. Ubicación de los puntos específicos donde se aplicó el concepto de ciudad esponja en Fengxi. (Mao et al., 2024)

En cuanto al desarrollo de las soluciones anteriormente mencionadas, se diseñaron de manera complementaria, teniendo en cuenta cada una de las funciones de las mismas para una optimización hídrica. Los pavimentos permeables facilitan la recarga de los acuíferos subterráneos por reducir de manera significativa el drenaje superficial, ayudado de los techos verdes y los humedales urbanos que retienen el agua pluvial y desempeñan un papel clave en la depuración de este medio respectivamente (Mao et al., 2024).

La integración de estas estrategias ha convertido a Fengxi en un ejemplo de cómo las SbN al integrarse con el entorno urbano dan respuesta a los problemas ambientales y climáticos, dando una mejora sustancial en la resiliencia ante eventos climáticos externos. Asegurado un mejor manejo del recurso hídrico al reducir el riesgo de inundaciones en este distrito tan especial, potenciando y siendo pionero en la interacción entre infraestructura convencional y medio ambiente (Mao et al., 2024).

4.1.5 Xi'an

La escasez de agua y los problemas frecuentes de inundaciones caracteriza a la ciudad de Xi'an, por esto, fue considerada como un estudio de caso. Se localiza en la provincia de Shaanxi, China, al norte de las montañas Qinlin, que se conocen como la llanura de Guanzhong, con un área de estudio de 10.108 kilómetros cuadrados, comprendida por una población permanente para el año 2020 de 13,16 millones de habitantes (Luo et al., 2022).

Esta llanura es una de las regiones más densamente pobladas de Shaanxi, con un porcentaje de ocupación cerca del 26,94%. Así pues, ha generado un crecimiento masivo urbanístico, expandiendo áreas residenciales e industriales y aumentando la demanda de servicios públicos, concentrando el 63,35% de la población provincial y aportando un producto interno bruto (PIB) del 62,35% (Luo et al., 2022).

La elevada densidad de habitantes, ha dado lugar a la vulnerabilidad a eventos climáticos extremos, donde la mayoría de los ciudadanos han vivido de manera directa las lluvias fuertes e inundaciones urbanas. Pero, además, ha sido influenciada por la variabilidad estacional de esta

zona de China, afectada por el monzón cálido del sureste en verano, donde se concentra el 43% de las precipitaciones con frecuentes tormentas de alta intensidad y el monzón frío en invierno. Todo esto, con una representación de agua pluvial anual de 740mm (Luo et al., 2022).

Estas situaciones han generado una mayor conciencia de lo que ocurre con el drenaje urbano y los desafíos que enfrenta. La capacidad de esta red hidráulica resulta insuficiente debido a la alteración en los usos del suelo producidos por la urbanización, teniendo en cuenta que el terreno se caracteriza por ser franco arenoso, con una permeabilidad baja y un alto potencial de escorrentía pluvial (Luo et al., 2024).

En consecuencia, en el 2014 el gobierno local incorporó el enfoque de ciudad esponja a partir de políticas y regulaciones con el fin de mitigar estos eventos. Como parte de lo mencionado, se empezó a construir sistemas de biorretención, para llevar a cabo la captura y almacenamiento del agua de manera temporal; se hizo uso de infraestructura con jardines verdes, para reaprovechar el medio hídrico y pavimentos permeables, reduciendo el volumen de escorrentía (Luo et al., 2022).

Asimismo, se desarrollaron en áreas estratégicas cinturones verdes para regular el agua pluvial, favoreciendo el microclima local. Por otro lado, se realizaron campañas informativas para brindar una educación ambiental, instalando bodegas de retención y reutilización de la misma, con la finalidad de fomentar la comprensión de su manejo adecuado, así como la resiliencia ante condiciones climáticas adversas (Luo et al., 2022).

La puesta en marcha de estas medidas no solo mejoró la regulación térmica de Xi'an, sino que también aportó significativamente a la reducción de la escorrentía para su posterior reúso. De la misma manera, los habitantes mostraron su satisfacción en lo relacionado a estos factores y en la estética de la ciudad dado su alta tasa verde (Luo et al., 2022).

Así como China lidera la iniciativa del modelo de Ciudad esponja, hay algunos países en diferentes lugares del mundo que se han unido a la aplicación de este de una u otra manera. Estos son:

4.2 Dinamarca, Copenhague

Copenhague, ciudad capital de Dinamarca, pertenece a la región de Oresund, junto con Malmo en Suecia. Su población es de 2.5 millones en su área metropolitana y alrededor de 600.000 personas en su municipio. Esta se unió a la causa de fomentar acciones climáticas preparándose para un clima más cálido y húmedo (Fumero, 2020).

Esta iniciativa fue resultado de un suceso ambiental extremo ocurrido el 2 de julio de 2011, día en que se produjo la inundación más importante de las últimas décadas. Este hecho provocó que el agua superara las defensas de la ciudad, dirigiéndose al área urbana e inundando todo el centro. En 10 minutos cayeron 20mm de lluvia y en 2 horas, más de 150mm, causando daños estimados cerca de 800 millones de euros (Fumero, 2020).

Por esto, se empezó con la planificación de un Plan de Adaptación de Aguas Pluviales de Copenhague, desarrollando proyectos piloto que incorporan SUDS en toda la ciudad. Se

instalaron calles verdes, cuencas de retención y humedales urbanos para controlar el exceso de las precipitaciones (Montazeri, 2024).

El primer proyecto de ellos, Tásinge Plads, se considera como el primer espacio urbano de esta ciudad adaptado al clima, logrando retener y filtrar el agua pluvial de los edificios y superficies circundantes alrededor de 4300 metros cuadrados. La plaza actúa como un mecanismo de gestión hídrica y a su vez, brinda un espacio de recreación y convivencia. Por una parte, se conforma de una serie de dunas con sustratos permeables que permiten filtrar el agua en el suelo, y por la otra se diseñó con vegetación seleccionada como una depresión específica, facilitando la retención y filtrado del recurso si es necesario (Fumero, 2020).

En segundo lugar, se construyó la plaza Skt. Kjelds Plads, que funciona como nodo de conexión para todas las calles a su alrededor, reduciendo progresivamente la cantidad de vehículos presentes en esta zona impermeable y dando prioridad a peatones, así como a IG. Las áreas adyacentes a los edificios se conformaron de parques, espacios para el descanso y juegos infantiles, con esto, permanecen puntos de retención secos que pueden funcionar como colectores de agua en caso de tormentas extremas (Fumero, 2020).

Este plan de gestión logró la regeneración urbana de Copenhague, transformando espacios infrautilizados como plazas, parques públicos y zonas recreativas. Además, gracias a esto se evitó graves inundaciones por eventos pluviales ocurridos posteriormente y redujo los daños causados por las mismas en un 80%, porcentaje considerable que evidencia la eficiencia del sistema (Montazeri, 2024).

4.3 Australia, Melbourne

En Australia, se encuentra el caso particular de la Ciudad de Melbourne, la cual, gracias a la urbanización acelerada, ha visto un incremento en la cantidad de superficies no permeables. Esto ha afectado directamente a la absorción natural del agua de lluvia, generando aumento en el escurrimiento, lo que llevó a esta metrópoli a enfrentar dificultades en la administración sus aguas pluviales (Montazeri, 2024).

La capital del estado de Victoria registra un clima templado oceánico, experimentando variabilidad notable en las condiciones meteorológicas siendo estos significativos. En la última década, el régimen de precipitaciones se ve evidencia más irregular, manifestando periodos de sequias interrumpidas por lluvias torrenciales, lo que ha llevado a un aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas extremas (Montazeri, 2024).

Esta situación que atraviesa, ha puesto a prueba la capacidad con la que fueron diseñados los sistemas pluviales los cuales no pueden hacer frente a los volúmenes de agua pluvial, provocando desbordamientos en los mismos y se experimentan inundaciones significativas en áreas vulnerables. Dada la problemática se ha pensado en una solución viable como lo son los LID y SUDS (Montazeri, 2024).

Melbourne ya ha comenzado a implementar este tipo de medidas LID al integrar techos verdes y jardines de lluvia en nuevos proyectos de urbanización y en barrios residenciales. Estos actúan en pro de la retención, absorción y reducción de los volúmenes de escorrentía, liberando la carga del sistema de drenaje convencional existente en esta ciudad. Por otra parte, la

instalación de los SUDS en las zonas suburbanas representa una estrategia efectiva en el manejo del agua, como estanques de retención, zanjas y humedales artificiales donde se permite que estas sean llevadas a cabo por la disponibilidad de espacio a gran escala (Montazeri, 2024).

Figura 29

Características de los SUDS en Melbourne



Nota. Se visualiza la aplicación de SUDS en Melbourne. (Montazeri, 2024)

Además de estas estrategias, el concepto de Ciudad esponja desarrollado en China ha estado presente en la planeación de Melbourne. Aunque no se han implementado estos enfoques, en algunos sectores bajo estudio, presentan condiciones favorables en cuanto a mitigar la problemática de las inundaciones y periodos de escases hídrica mejorando la resiliencia ante eventos climáticos y brindando seguridad en el suministro hídrico (Montazeri, 2024).

No obstante, su puesta en marcha conlleva retos considerables como la exigencia de realizar una inversión sustancial para actualizar la infraestructura existente, y la dificultad que se presenta al sincronizar a los distintos sectores que intervienen en el ordenamiento urbano y la administración de los recursos para este medio. Por lo que, actualmente este concepto no se ha desarrollado en este continente (Montazeri, 2024).

4.4 Alemania, Berlín

Berlín es la ciudad más poblada de Alemania, con unos 3,77 millones de habitantes para el año 2019 y un área de 892 kilómetros cuadrados. Esta se ha comprometido a colocar en marcha estrategias eficaces a problemas locales como inundaciones y calor urbano, formando alianzas dentro y fuera de la Unión Europea (Senge, 2022).

Los inconvenientes son producidos a raíz de su alta densidad poblacional, lo que afecta el potencial de infiltración y la hace vulnerable a impactos negativos causados por el cambio climático. Berliner Wasserbetriebe (BWB), organización que regula la gestión del agua, se dio cuenta de la ineficiencia del sistema de alcantarillado, planificado solo para lluvias normales y con falta de espacio para ser ampliado. A partir de ahí, el concepto de esponja fue ideal ante la crisis, en la búsqueda de aliviar las alcantarillas y ofrecer protección (Senge, 2022).

La aplicación del modelo es orientada por el Step Climate y el Berliner Regenswasseragentur, medidas propuestas por el SenUVK (Departamento de Medio Ambiente, Movilidad Urbana y Consumo del Senado Protección y Acción Climática). Estos establecen

técnicas de enfriamiento, aislamiento térmico, estética, mediante la adecuación del espacio abierto y las fachadas de los edificios (Senge, 2022).

Un claro ejemplo de su ejecución e interés es la Postdamer Platz, una plaza que interseca con el tráfico en Berlín. Anteriormente, luego de la Segunda Guerra Mundial quedó en ruinas, sin embargo, se realizó una reconstrucción integrando el método esponja con la finalidad de darle un uso que incluyera actividades de ocio, recreación y oficinas (Senge, 2022).

Las instalaciones integradas permiten captar cerca de 44.000 metros cuadrados de agua pluvial, que se recolecta y canaliza en cisternas subterráneas para servir de reserva como agua gris. Adicionalmente, a través de biotopos vegetados que funcionan en las calles y aceras, se lleva a cabo un proceso de purificación in situ, que promueve su reinserción de forma controlada (Senge, 2022).

Los éxitos de su diseño sostenible destacan su impacto ambiental positivo en términos de eficiencia energética, hídrica y climática. Con la primera citada, el proyecto refleja un enfoque integral, ahorrando hasta el 50% de la energía primaria y reduciendo el 70% de las emisiones de carbono mediante fuentes renovables. En lo referente al manejo de agua, se registró una optimización de 20 metros cúbicos de agua potable y se desarrolló una red de retención unificada que es capaz de almacenar 13.500 metros cúbicos provenientes de las precipitaciones. Ahora, con la temperatura, se obtuvo un descenso promedio cerca de 2 °C en la zona circundante (Senge, 2022).

La Postdamer Platz es reconocida luego de su rehabilitación con diversas distinciones, para los berlineses y para el Consejo Alemán de Construcción Sostenible (DGNB), quien le otorgó un certificado de plata por su diseño ecológico ejemplar. El plan demuestra el potencial de una planificación urbana ecológica para hacer de las ciudades, lugares con entornos más resilientes. Así, la iniciativa se ha consolidado como un ejemplo icónico de desarrollo ambientalmente responsable (Senge, 2022).

4.5 Estados Unidos, New York

La ciudad de New York siendo una de las más importantes en todo el mundo, durante la última década, ha presentado inconvenientes en aumento en cuanto a la gestión de las aguas pluviales. La expansión de esta ciudad a través del incremento de las superficies impermeables, el crecimiento poblacional y los efectos del cambio climático ha intensificado la urgencia de adoptar la sostenibilidad como respuesta a dicha problemática (Zahmatkesh et al., 2014).

Tras múltiples estudios desarrollados para determinar cuál enfoque utilizar para mitigar los efectos generados al ciclo hidrológico, se llegó a la conclusión de adherirse al concepto LID. Los cuales, en diferencia de la propuesta convencional, son viables a largo plazo, ya que disminuyen en los cuerpos de agua la contaminación y el riesgo de inundaciones, siendo eficaz en la reducción de dicho impacto en el desarrollo urbano (Zahmatkesh et al., 2014).

Por lo tanto, se han implementado distintos sistemas LID a lo largo de los años como pavimentos permeables, jardines de lluvia, techos verdes y sistemas de biorretención. Esta victoria en la ciudad, se dio gracias en parte a la fomentación generada acerca de estas prácticas

y al desarrollo de los incentivos financieros entregados a las empresas, desarrolladores y propietarios que opten por incorporar IG en sus propiedades (Montazeri, 2024).

Sumado a esto, se han llevado a cabo simulaciones bajo el modelo SWMM5 de la EPA, para cuantificar el rendimiento de las practicas previamente mencionadas. Como caso de estudio se encuentra la cuenca del río Bronx, contando con una superficie de 124km² donde predominan sectores industriales, comerciales y residenciales, por lo que se ha visto una disminución en la absorción natural del suelo y crecimiento en el escurrimiento de aguas lluvias (Zahmatkesh et al., 2014).

Al ser ejecutado este modelo, los resultados de la aplicación de los LID se evidencian que puede reducir tanto el volumen anual de esorrentía en un 41%, los caudales máximos entre un 8% a 13% y la atenuación en eventos de retorno la esorrentía de 2 y 50 años un 28% y 14%, respectivamente. Lo que significaría un gran avance en refutar la adopción de estos sistemas para dar un enfoque resiliente y sostenible en la planificación urbana de New York (Zahmatkesh et al., 2014).

Por otra parte, está el caso de América Latina donde aún no se encuentra una ciudad que abarque a cabalidad la gran escala de ciudad esponja. Mientras tanto, se han considerado iniciativas con este enfoque holístico en pro de la naturaleza y la administración del recurso hídrico, en países como Brasil y Colombia.

En Brasil, específicamente en Río de Janeiro, se redujeron las inundaciones al construir hace una década la Praca da Embalse de Bandeira la cual recibe y almacena todo el caudal proveniente de la plaza. Su capacidad equivale a 18 millones de litros, mitigando los anegamientos de la misma. Adicionalmente, se construyeron embalses a nivel del sótano en plazas como Niteroi, Bandeira y Varnhagen, con el fin de crear un sistema de infraestructura resiliente (Eccard et al., 2024).

Asimismo, en Colombia, encontramos el caso de Bogotá, donde se realizó una selección de los SUDS que se adaptaban más a las condiciones de la ciudad, a partir de investigaciones por parte de la Universidad de los Andes y la Secretaría de Ambiente y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado local. Estas estructuras, algunas instaladas, fueron alcorques inundables, zanjas de infiltración, cunetas verdes, urnas de biorretención, tanques de almacenamiento, cunetas secas de drenaje extendido y pavimentos impermeables (Alcaldía de Bogotá, 2021).

Figura 30

Ejemplo de un alcorque inundable



Nota. Se refleja la implementación de alcorques inundables en Bogotá. (Alcaldía de Bogotá, 2021)

La siguiente tabla expone de manera clara, lo indicado con anterioridad acerca de los países más relevantes que se han propuesto transformar sus ciudades mediante alternativas sostenibles como lo es la propuesta de ciudad esponja. Se presentan las causas de las problemáticas producidas por las inundaciones, las soluciones pertinentes de acuerdo a cada situación, así como los beneficios significativos que han obtenido a partir de su ejecución.

Tabla 3*Análisis comparativo de la aplicación de ciudad esponja*

País/Ciudad	Causas de la problemática	Solución sostenible	Beneficios sostenibles	¿Aplica como ciudad esponja?	Fuentes
China, Zhengzhou	Terreno con baja capacidad de infiltración. Infraestructura insuficiente y deficiente.	Construcción de 191 canales de inundación. Áreas de detención. Depósitos de agua pluvial y residual. Corredores ecológicos. Suelos permeables. Techos verdes. Muros verdes.	Eliminación de 125 puntos de riesgo de estancamientos. Transporte de 380 millones de toneladas de agua reciclada.	Sí, hace parte de los 30 proyectos piloto seleccionados en China.	(Karnicar, 2024)
China, Pingxiang	Precipitación desigual, muy elevada. Escasez hídrica. Calidad de agua e	Pavimentos permeables. Techos verdes. Biojardines. Cinturones ecológicos. Áreas de almacenamiento	Mejora en la calidad de agua mayor al 50%. Ahorro anual del recurso cerca de 2 millones 560 mil toneladas.	Sí, es el primer proyecto piloto de Ciudad esponja en China.	(Han & Wu, 2019) (Men et al., 2020) (Wang et al., 2018)

País/Ciudad	Causas de la problemática	Solución sostenible	Beneficios sostenibles	¿Aplica como ciudad esponja?	Fuentes
	infraestructura acorde para su tratamiento.	Estaciones de bombeo.	Reducción del 30% al 75% en la tasa de escorrentía anual. Mitigación de 49 puntos vulnerables a acumulación de agua. Protección de 43 bloques residenciales expuestos a riesgos anteriormente.		
China, Beijing	Superficie impermeable. Crecimiento urbano.	Zonas de contención. Pavimentos permeables. Techos verdes. Jardines de lluvia.	Reducción de desbordamientos anuales del 41%.	Sí, corresponde al grupo de China considerados	(Gong et al., 2019) (Zhang et al., 2018)

País/Ciudad	Causas de la problemática	Solución sostenible	Beneficios sostenibles	¿Aplica como ciudad esponja?	Fuentes
	Elevado potencial de escorrentía.	Sistemas de biorretención. Zanjas de infiltración. Humedales artificiales.	Disminución del CSO desde 10-26%. Mejora en la reducción del 44.13% de la escorrentía.	como proyectos piloto.	
China, Fengxi	Tormentas frecuentes. Suelo con alta escorrentía y baja permeabilidad.	Techos verdes. Jardines de lluvia. Pavimentos permeables. Aceras permeables. Humedales urbanos.	Resiliencia ante eventos climáticos extremos. Reducción de inundaciones. Depuración del agua.	Sí, fue seleccionada como proyecto piloto en China.	(Mao et al., 2024)
China, Xi'an	Crecimiento urbanístico.	Sistemas de biorretención. Jardines verdes. Pavimentos permeables.	Regulación térmica. Reducción de la escorrentía.	Sí, hace parte de los 30 proyectos piloto	(Luo et al., 2022)

País/Ciudad	Causas de la problemática	Solución sostenible	Beneficios sostenibles	¿Aplica como ciudad esponja?	Fuentes
	Capacidad hidráulica insuficiente. Tormentas de alta intensidad.	Cinturones verdes. Bodegas de retención.	Mejora en la estética.	seleccionados en China.	
Dinamarca, Copenhague	Aumento del nivel de mar. Tormentas intensas. Intensificación de lluvias.	Calles verdes. Cuencas de retención. Humedales urbanos. Espacios verdes con vegetación seleccionada. Puntos de retención y conducción.	Prevención de inundaciones posteriores. Reducción de daños causados por inundaciones hasta un 80%.	Sí, se ha aplicado este concepto a gran escala, alrededor de toda la ciudad.	(Fumero, 2020) (Montazeri, 2024)
Australia, Melbourne	Urbanización acelerada. Incremento en la cantidad de superficies impermeables.	Jardines de lluvia. Techos verdes. Estanques de retención. Zanjas. Humedales artificiales.	Mitigación de las inundaciones. Mejora en la resiliencia ante eventos climáticos.	No, debido a la disponibilidad de espacio a gran escala insuficiente.	(Montazeri, 2024)

País/Ciudad	Causas de la problemática	Solución sostenible	Beneficios sostenibles	¿Aplica como ciudad esponja?	Fuentes
	Lluvias torrenciales. Infraestructura deficiente.		Seguridad en el suministro de agua.		
Alemania, Berlín	Alta densidad poblacional. Sistema de alcantarillado diseñado solo para lluvias normales. Espacio insuficiente para ampliar la red convencional.	Muros verdes. Instalaciones de infiltración. Biotopos vegetados. Cisternas subterráneas.	Ahorro de agua cerca del 50%. Reducción del 70% de emisiones de carbono. Optimización de 20 metros cúbicos de agua. Red de retención unificada con capacidad de almacenar 13.500 metros cúbicos de agua pluvial.	No, sin embargo, se encuentra en proceso de expansión debido a su éxito en los proyectos con el modelo de esponja.	(Senge, 2022)

País/Ciudad	Causas de la problemática	Solución sostenible	Beneficios sostenibles	¿Aplica como ciudad esponja?	Fuentes
Estados Unidos, New York	Incremento poblacional. Superficies impermeables.	Pavimentos permeables.	Reducción de 2°C en su temperatura.		
		Jardines de lluvia.	Reducción del volumen de	No, dado que requiere la	(Zahmatkesh et al., 2014).
		Techos verdes.	escorrentía.	rehabilitación	
		Sistemas de biorretención.	Resiliencia ante condiciones extremas.	o ejecución de espacios que no son lo suficientemente amplios.	

Capítulo 5: Expectativas futuras y obstáculos

El éxito de la ejecución del modelo de ciudad esponja en los diferentes lugares del mundo, principalmente en China, ha generado un direccionamiento hacia el futuro, en el que se espera realizar muchas mejoras en su aplicación que permitan ir perfeccionando este sistema y, por ende, contribuyan a una eficiencia mayor de los proyectos. Esto abarca diversos factores que van desde estrategias sólidas para la planificación urbana hasta fomentar la capacitación profesional y financiación de proyectos de Low Impact Development (LID) (Li & Zhang, 2021).

En primer lugar, como se señaló anteriormente, el hecho de una organización adecuada por parte de los gobiernos locales junto a planificadores e ingenieros implica establecer acuerdos acerca del uso del suelo y la priorización de infraestructura pluvial que satisfaga la propuesta de esponja. Se trata de crear un pensamiento integral que incluya aspectos como paisaje, infraestructura, regulaciones, monitoreo y gestión de los proyectos, fomentando la transformación de la ideología del sistema de construcción habitual (Jia et al., 2017).

Para lograr esto, existe la necesidad de tener en cuenta indicadores como la ubicación geográfica del proyecto y su entorno, el funcionamiento de los ríos y lagos de la ciudad y los problemas existentes relacionados con el equilibrio del agua; considerando el punto máximo de escorrentía, su grado de contaminación y la viabilidad de su tratamiento y reutilización. Así, se busca integrar una perspectiva adicional de gestión y gobernanza, con la finalidad de planificar la edificación de una manera especial y eficaz, que permita diseñar, construir, evaluar y conservar los proyectos, brindando un espacio agradable y seguro (Li & Zhang, 2021).

La planificación de toda obra de infraestructura debe estar guiada por una normativa determinada que establezca las condiciones para cada fase de la construcción, por lo que ya existen varias guías que promueven esta iniciativa y orientan en el proceso. Sin embargo, se espera que, a futuro, se presenten restricciones en un marco de regulación estatal que detalle información relevante y clara sobre clima, hidrología, suelo e incluso lo referente a vegetación. De igual manera, se hace necesario disponer con requisitos de monitoreo e interpretación que facilite los datos cuantitativos de rentabilidad y desempeño de las instalaciones (Jia et al., 2017).

Esto, a su vez, ha propiciado el planteamiento de la integración de tecnología aplicado al concepto de ciudad esponja, como el Sistema de Información Geográfica (SIG) y Teledetección (RS) que simulan los procesos de afluencia y contaminación. La supervisión del sistema de drenaje puede contribuir a dar respuesta ante emergencias por precipitaciones, facilitando la toma de decisiones, por lo que, se espera desarrollar nuevas tecnologías informáticas que brinden apoyo complementario de diseño (Li & Zhang, 2021).

Por otra parte, ya abordados estos aspectos, se ha contemplado en la posibilidad de crear una empresa que suministre de una manera estable los materiales adecuados para la incorporación de las estructuras sostenibles. En este contexto, una base industrial consolidada, permitiría que los fabricantes de ladrillos permeables, concreto ecológico y tuberías de infiltración proporcionaran una certificación de los productos utilizados en los espacios públicos, contribuyendo al éxito de las intervenciones urbanas y generando nuevas oportunidades de negocio (Jia et al., 2017).

De esta manera, estos factores demandan un financiamiento económico y razonable. Por ende, se han evaluado diversas opciones a largo plazo, como establecer una cartera de Asociaciones Público Privadas (APP), gestionada por parte de las entidades gubernamentales, además de créditos transparentes e incentivos que permitan dar credibilidad a los proyectos esponja y con ello, generen confianza de inversión para las empresas del sector privado. Con esto, se lograría un beneficio mutuo para las partes involucradas (Li & Zhang, 2021).

Asimismo, se han evaluado alternativas para que los gobiernos utilicen estrategias como tarifas de desarrollo, créditos nacionales específicos e impuestos de recuperación de plusvalías, que impulsen la inversión en las ciudades esponja. Todo esto, con la responsabilidad y compromiso adecuados para movilizar eficientemente los recursos existentes, sin realizar ningún tipo de desvío económico y formulando su gestión para lograr invertir en todo lo planificado de forma eficaz (Li & Zhang, 2021).

La orientación gubernamental es esencial para aumentar la implicación ciudadana, fomentando la publicidad y educación sobre el ahorro del agua, sensibilizando a la población respecto a la protección ambiental y vinculando a la comunidad con esta estrategia de desarrollo urbano. Así, se ha propuesto la posibilidad de realizar capacitaciones profesionales para el diseño, edificación y cuidado de los LID, en conjunto con grupos ambientalistas, logrando la comprensión y apoyo generalizado (Jia et al., 2017).

Sin embargo, la aplicación a una escala mayor se ve afectada por ciertas barreras que dificultan su progreso. Basándose en la información disponible, se identifican los componentes

clave que causan las principales limitantes, siendo estos aspectos: social, económico y normativo, los cuales serán presentados a continuación.

La construcción de los proyectos de ciudades esponja incluye amplias áreas de conocimiento, que generalmente la ciudadanía desconoce, lo que da origen a un tema social representado por poca sensibilidad, falta de conocimiento e interés por adoptar esta propuesta en los espacios públicos y privados. Esto desencadena un grado de disparidad de las partes involucradas (Montazeri, 2024).

Considerando lo anterior, debido a que no se cuenta con el conocimiento adecuado del tema, se ignoran los beneficios que esta solución brindaría en términos de disminuir la variabilidad climática incrementada durante los últimos años, como también de un óptimo tratamiento, garantizando la depuración del recurso hídrico. La poca comprensión de la funcionabilidad de la IG y, por lo tanto, su aceptación, dada por la falta de divulgación y concienciación adecuadas (Li et al., 2017).

De este modo, la falta de cooperación entre las agencias, representado por su poco trabajo en equipo, obstaculiza el intercambio de datos e información y retrasa el progreso relacionado con esta medida integral. Esto da lugar a discrepancias en la construcción de las ciudades esponja, lo que causa una inútil planificación dejando de lado el avance en la urbanización ambiental, por lo que no se cuenta con una organizada distribución de los recursos (Li et al., 2017).

Hablando del factor económico, este también juega un papel importante, en la aplicación de estos proyectos, ya que, requieren de inversiones considerables. Por lo que este aspecto es clave para la sostenibilidad, factibilidad y éxito a largo plazo del desarrollo de las ciudades esponja.

La planificación estratégica y las APP son esenciales para dar viabilidad a estos proyectos de gran escala en las ciudades del mundo, dado que uno de los desafíos más relevantes en cuanto a este tema de estudio es la falta de recursos económicos. Estos no son lo suficientemente amplios para incorporar la IG y lo que implica el uso de estas tecnologías como formas de drenaje urbano (Montazeri, 2024).

Si bien los costos iniciales de diseño y construcción son bastante claros, se desconoce el costo de la vida útil de las infraestructuras, su funcionamiento y conservación a largo plazo. Generalmente, solo se contemplan los gastos para el inicio de los proyectos, generando un riesgo financiero para las organizaciones que invierten su capital de manera público-privada, lo cual, sin una imagen clara de los beneficios que podrían obtener, se abstienen de contribuir con este tipo de enfoques, limitando su financiamiento (Li et al., 2017).

Sumado a esto, al no contar con los recursos suficientes, la investigación y la innovación se ve afectada en gran medida. Esto impide que haya un avance continuo en el fortalecimiento de nuevas tecnologías, ya que no existe una evidencia científica que respalde el estudio de este campo, comprometiendo la toma de decisiones al momento de ejecutar los proyectos de ciudades esponja en los diferentes lugares (Li et al., 2017).

Por otra parte, la implementación de estas soluciones urbanas, enfrenta barreras regulatorias y burocráticas. De esta manera, al tener la incertidumbre de que estos proyectos se adopten de una manera inadecuada, se ve afectada la incorporación de estas en los planes de desarrollo urbano, además de que la falta de coordinación entre los entes gubernamentales, limita el manejo de los desafíos hídricos (Li et al., 2017).

Se encuentra una ausencia en la normativa acerca de la adopción de las medidas basadas en la naturaleza, las guías existentes para la gestión del recurso hídrico, no están adaptadas para incluir la IG. Además, en muchos países el diseño, construcción, mantenimiento y desempeño de una ciudad esponja no es clara en cuanto a sus directrices, por lo que dificulta su aprobación (Li et al., 2017).

Los códigos actuales y ordenanzas normalmente favorecen a la infraestructura gris sobre los enfoques basados en la naturaleza, por lo que se obstaculiza la ejecución a gran escala. Además, las agencias públicas no garantizan realizar un seguimiento en fases como supervisión y mantenimiento de estas soluciones a largo plazo, por lo que, gran parte de las mismas, se realizan en terrenos privados. Es ahí donde se aumenta la incertidumbre en la ejecución de estos planes en el sector público, dado que son ausentes las directrices nacionales en pro a las medidas sostenibles y sus estándares de desempeño (Li et al., 2017).

Dada esta situación, la creación de normativas nuevas puede ser un proceso prolongado y costoso, donde en muchas ocasiones los desarrolladores pueden resistirse a este tipo de propuestas, debido a los costos de producción o a la complejidad de las mismas. Esto conlleva a

un obstáculo significativo en la integración de las ciudades esponja tanto en los proyectos actuales como en los planteados a futuro (Montazeri, 2024).

Capítulo 6. Conclusiones

De acuerdo con la información que dejó esta investigación, se refleja el liderazgo por parte de China en el desarrollo del marco de ciudad esponja, sentando un precedente global para diferentes ciudades del mundo como Melbourne, Berlín y New York con un arduo interés por replicar sus estrategias de adaptación ante el cambio climático. Si bien no todas han ejecutado estas medidas a gran escala debido a los desafíos que representa la urbanización, sí se ha comprobado la incorporación progresiva de las soluciones basadas en la naturaleza, representando un camino prometedor hacia un futuro resiliente.

En síntesis, países líderes como China han investigado acerca de la gestión hídrica basándose en un enfoque sostenible, reconociendo el alcance transformador de los SUDS. Sin embargo, es evidente la ausencia de normatividad específica, lo que dificulta en gran medida la adopción de estas tecnologías a nivel global, generando disparidad en su interpretación, retardando el crecimiento constante de este enfoque y fomentando el uso de sistemas convencionales poco sostenibles.

La propuesta de ciudad esponja se ve comprometida por diversos obstáculos que impiden la correcta materialización de esta iniciativa, ralentizando su debida expansión debido a que existen dificultades para obtener la totalidad de los materiales ecológicos requeridos, limitaciones económicas presentadas por los altos costos iniciales de implementación y mantenimiento, y barreras sociales, reflejadas por la falta de conciencia pública y la resistencia al

cambio. Sumado a esto, la carencia de la estandarización normativa imposibilita la aplicación de estrategias sostenibles exitosas.

La consolidación del método de ciudad esponja se verá afectado por un abordaje integral que incluye aspectos socioambientales como el desarrollo de una industria sólida que brinde los materiales ecológicos necesarios, y la formación especializada del personal sumado a la participación ciudadana, dando lugar al conocimiento del asunto de interés y fortaleciendo la viabilidad de este tipo de proyectos. Esto promueve el interés de las APP que, mediante propuestas sostenibles, lograrían enfrentar las limitantes y garantizar el éxito de esta ideología.

Finalmente, se considera que existe la necesidad de mejorar diversos aspectos críticos que previamente fueron destacados, para cumplir los objetivos propuestos en las diferentes ciudades del mundo, logrando minimizar las afectaciones ocasionadas por las variaciones del clima. Es evidente que, los proyectos de ciudades esponja, representan una respuesta sostenible urbana que se debe fortalecer, ya que, maximizaría los entornos, haciendo de estos, lugares más adaptables.

Capítulo 7. Recomendaciones

Se sugiere que, los distintos países del mundo establezcan relaciones que permitan el intercambio de investigaciones, conocimientos, normativas y prácticas generales que extiendan el campo de estudio de las ciudades esponja y se proporcionen herramientas efectivas que faciliten su aplicación. Esto garantiza la adopción óptima de los lineamientos técnicos, obteniendo un mejor rendimiento en su puesta en marcha.

Se recomienda que, las organizaciones a nivel internacional se comprometan a desarrollar regulaciones técnicas que incorporen lineamientos específicos de las ciudades esponja considerando su lugar de ejecución y demás aspectos relacionados. Así, se daría lugar a una consolidación efectiva de los proyectos que abarquen estos conceptos, sin ningún tipo de confusiones al respecto.

Se propone promover una cultura sostenible a partir de la sensibilización en entidades públicas y privadas, como instrumento de comprensión de las ciudades esponja, y la implementación de incentivos normativos que estimulen el interés investigativo que garantice una inclusión futura de la metodología. Al fortalecer el campo científico, se alcanzarán metas que optimicen inversiones sostenibles bajo los enfoques económicos, ambientales y sociales.

Se participa a los entes gubernamentales, la necesidad de incorporar programas de formación relacionados con el aprendizaje ecológico y el compromiso ciudadano, con el objetivo

de lograr implementaciones a largo plazo que cambien la perspectiva de la comunidad ante estos métodos sostenibles, mitigando errores de implementación.

Se plantea la inclusión de un sistema de monitoreo que permita la evaluación del rendimiento de las prácticas implementadas conforme a la metodología de ciudad esponja, con la finalidad de medir el impacto generado y conocer específicamente los beneficios ambientales, económicos y sociales obtenidos.

Referencias

Alcaldía de Bogotá. (2021). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en Bogotá | Bogota.gov.co.

<https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-en-bogota>

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). Decreto 597 de 2018 Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.

<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=81203>

Álvarez Pinzón, G. L. (2017). El reúso de aguas residuales en Colombia. Bogotá : Universidad

Externado de Colombia, 2017. <https://bdigital.uexternado.edu.co/handle/001/2344>

Blanco, J. A., Noriega, P., Lledó, S., & Hernández, I. (2023). Guía básica de diseño de Sistemas

Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el Término Municipal de Murcia.

<https://www.apirm.es/wp-content/uploads/2024/07/Guia-B%C3%A1sica-de-dise%C3%B1o-de-Sistemas-Urbanos-de-Drenaje-Sostenible-del-municipio-de-Murcia.pdf>

Borge-Leandro, D. (2024). Infraestructura verde para el control pluvial como medida de

adaptación al cambio climático. *Revista Tecnología en Marcha*, Pág. 104-114.

<https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7049>

Boyero, L., Lecunoa, J., & Lopez, M. (2021). (PDF) Sinergias y compromisos entre la infraestructura gris y la infraestructura ecológica urbana.

https://www.researchgate.net/publication/356069070_Sinergias_y_compromisos_entre_la_infraestructura_gris_y_la_infraestructura_ecologica_urbana?enrichId=rgreq-2bb32a79f8ca9111e53f9d311fbafbbe-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM1NjA2OTA3MDtBUzoxMDg4MzI1ODkzMdAxMjE5QDE2MzY0ODg1MjEzOTM%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf

Canada, E. and C. C. (2024, marzo 22). Federal sustainable development strategy.

<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/federal-sustainable-development-strategy.html>

Checa, M., & Pazos, M. (2018). Guía Básica de Diseño de Sistemas de Gestión Sostenible de Aguas Pluviales en Zonas Verdes y otros Espacios Libres.

<https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/guia-basica-de-diseno-de-sistemas-de-gestion-sostenible-de-aguas-pluviales-en-zonas-verdes-y-otros-espacios-libres>

CIRIA. (2007). Site Handbook for the Construction of SuDS (C698).

https://www.ciria.org/CIRIA/CIRIA/Item_Detail.aspx?iProductCode=C698&Category=BOOK

CIRIA. (2015). The SUDS Manual (C753).

https://www.ciria.org/CIRIA/CIRIA/Item_Detail.aspx?iProductCode=C753&Category=BOOK

COAMSS. (2021). Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS. <https://opamss.org.sv/wp-content/uploads/2021/07/Resumen-Ejecutivo-Guia-Tecnica-de-Diseno-SUDS.pdf>

Conama, P. (2021, diciembre 20). Ciudades esponja: La apuesta de Murcia frente a las inundaciones. Fundación Conama. <https://www.fundacionconama.org/ciudades-esponja-murcia/>

CONAMA. (2011). CONAMA Resolution 430/11—Conditions and standards of effluents. Brazilian NR. <https://braziliannr.com/brazilian-environmental-legislation/conama-resolution-430-11-conditions-and-standards-of-effluents/>

Congreso Nacional. (1997). LEI No 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm

Constructed waterway design manual | Melbourne Water. (s. f.). Recuperado 9 de diciembre de 2024, de <https://www.melbournewater.com.au/building-and-works/developer-guides-and-resources/standards-and-specifications/constructed-waterway>

Departamento Nacional de Planeación. (2018). Lineamientos para el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS.

https://proyectostipo.dnp.gov.co/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=250&Itemid=321

Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. Ciencia y sociedad.

<https://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/bitstream/123456789/1392/1/CISO20123702-227-240.pdf>

Dierkes, C., Lucke, T., & Helmreich, B. (2015). General Technical Approvals for Decentralised Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)—The Current Situation in Germany.

Sustainability, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su7033031>

Dolz Ripollès, J., & Gómez, M. (1994). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores. Ingeniería del agua, 1(1), 55-66. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2631>

Dourojeanni, A. (1994). La gestión del agua y las cuencas en América Latina.

<https://hdl.handle.net/11362/11953>

Eccard, A., Saraiva, T., Mattos, L., Silva, F., Durigon, S., & Teza, J. (2024). A response to climate change: The role of sponge cities in flood mitigation in Lages, SC, Brazil |

Caderno Pedagógico.

<https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/6997>

ESDC. (2023, enero 4). *Sustainable Development Goal 11: Sustainable cities and communities*.

<https://www.canada.ca/en/employment-social-development/programs/agenda-2030/cities-communities.html>

Espinosa, M. L. C. (2011). PAVIMENTOS PERMEABLES COMO ALTERNATIVA DE DRENAJE URBANO. <https://core.ac.uk/download/pdf/71418921.pdf>

Femin, M. I., & George, E. H. (2022). Review on sponge city construction for flood management. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 10.

<https://doi.org/10.7770/safer-V10N1-art2537>

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., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & 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>

Fumero, A. (2020). Water Sensitive Urban Design (WSUD) as a climate adaptation strategy.

[Laurea, Politecnico di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/14934/>

Gobierno del Salvador. (2013). Ley General de Recursos Hídricos.

<https://faolex.fao.org/docs/pdf/els208513.pdf>

Gobierno Nacional, Consulta Interprovincial, Unión de Juntas de Agua, Asociación de Municipios Holandeses. (2003). Nationaal bestuursakkoord wáter.

https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/130138/nationaal_bestuursakkoord_water.pdf

Gong, Y., Chen, Y., Yu, L., Li, J., Pan, X., Shen, Z., Xu, X., & Qiu, Q. (2019). Effectiveness Analysis of Systematic Combined Sewer Overflow Control Schemes in the Sponge City Pilot Area of Beijing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091503>

Han, J., Wang, C., Deng, S., & Lichtfouse, E. (2023). China's sponge cities alleviate urban flooding and water shortage: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1297-1314. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01559-x>

Han, X., & Wu, Y. (2019). Construction and Application of “the Sponge City” in Different Precipitation Regions: Case Studies in Pingxiang and Ji’nan, China. *Energy Procedia*, 159, 207-212. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.052>

- Jia, H., Wang, Z., Zhen, X., Clar, M., & Yu, S. L. (2017). China's sponge city construction: A discussion on technical approaches. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(4), 18. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0984-9>
- Karnicar, C. (2024). Urban flood management in China: A case study of the sponge city concept in Zhengzhou [Thesis, Technische Universität Wien].
<https://doi.org/10.34726/hss.2024.123055>
- Labra, F., & Fehr, T. (2024). Gestión del agua y la vegetación urbana como infraestructura verde y soluciones basadas en la naturaleza. https://infraestructuraverdesantiago.cl/wp-content/uploads/2024/06/GUIA-02_SbN-Agua-y-Vegetacion-Urbana.pdf
- Li, F., & Zhang, J. (2021). A review of the progress in Chinese Sponge City programme: Challenges and opportunities for urban stormwater management. *Water Supply*, 22(2), 1638-1651. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.327>
- Li, H., Ding, L., Ren, M., Li, C., & Wang, H. (2017). Sponge City Construction in China: A Survey of the Challenges and Opportunities. <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/9/594>
- Li, X., Li, J., & Fang, X. (2016). (PDF) Case Studies of the Sponge City Program in China. https://www.researchgate.net/publication/303362681_Case_Studies_of_the_Sponge_City_Program_in_China?enrichId=rgreq-8e314cbf3562fab5c440f75b57b880e3-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMzMjY4MTtBUzo1NDgwMjkzMTI3

OTQ2MjRAMTUwNzY3MTc3ODMwOA%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf

López, N., Barreto, W., & Méndez, N. (2015). Techos verdes como solución al problema de inundaciones en medios urbanos. *Gaceta Técnica*, 14(1), Article 1.

<https://biblat.unam.mx/es/revista/gaceta-tecnica/articulo/techos-verdes-como-solucion-al-problema-de-inundaciones-en-medios-urbanos>

Luo, P., Zheng, Y., Wang, Y., Zhang, S., Yu, W., Zhu, X., Huo, A., Wang, Z., He, B., & Nover, D. (2022). Comparative Assessment of Sponge City Constructing in Public Awareness, Xi'an, China. *Sustainability*, 14(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/su141811653>

Luo, L., Sua, D., Wang, T., & Guob, W. (2024). Integrated assessment of available water volume for sustainable sponge city construction – A case study in Xi'an, China | *Water Science & Technology* | IWA Publishing. <https://iwaponline.com/wst/article/89/5/1282/100516/Integrated-assessment-of-available-water-volume>

Mao, Y., Li, Y., Bai, X., Han, Y., & Fu, X. (2024). Scenario-Based Green Infrastructure Installations for Building Urban Stormwater Resilience—A Case Study of Fengxi New City, China. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/10/3990>

Martens, W. J. M., Slooff, R., & Jackson, E. K. (1998). El cambio climático, la salud humana y el desarrollo sostenible. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 4(2), 100-105.

<https://doi.org/10.1590/S1020-49891998000800005>

Martín Vide, J. (2009). Conceptos previos y conceptos nuevos en el estudio del cambio climático reciente. *Investigaciones Geográficas*, 49, 51.

<https://doi.org/10.14198/INGEO2009.49.03>

Mas, F. M., Sánchez, F. M. C., & Martín, B. M. (2018). Infraestructuras verdes y azules: Estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático. *Revista Digital del Cedex*, 191, Article 191. <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2350>.

Men, H., Lu, H., Jiang, W., & Xu, D. (2020). Mathematical Optimization Method of Low-Impact Development Layout in the Sponge City. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020(1), 6734081. <https://doi.org/10.1155/2020/6734081>

Miguel, A. E., Torres Váldez, J. C., & Maldonado Cruz, P. (2011). Fundamentos de la planificación urbano-regional. Oxaca, Oax: Instituto tecnológico de oxaca. Recuperado de https://biblioteca.utec.edu.sv/siab/virtual/elibros_internet/55826.pdf

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio—Gestor Normativo.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2022). *Guía metodológica para la formulación e implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible*.

https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/suds_v.0.0.pdf

Ministerio para la transición ecológica del Gobierno de España. (2019). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Diseño de la Ciudad.

<https://www.disenodelaciudad.es/sistemas-urbanos-drenaje-sostenible/>

MOHURD. (2016). “Especificaciones Técnicas para la Construcción de Infraestructuras de Ciudades Esponja (CJJ/T 245 – 2016)”.

<https://ebook.chinabuilding.com.cn/zbooklib/bookpdf/probation?SiteID=1&bookID=607>

69

Montazeri, B. (2024). A comparative study of LID, SuDS, and Sponge City strategies. [Laurea, Politecnico di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/32417/>

Ortiz-Hernández, J. E., Beltrán-Hernández, I., Lizárraga-Mendiola, L., Coronel-Olivares, C., & Vázquez-Rodríguez, G. (s. f.). Biorretención y reúso del agua de escorrentía urbana en

climas áridos o semi-áridos: Una revisión.

https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6238/2013_memoria_simci_joyce.pdf

Parlamento Europeo. (2000). BOE.es—DOUE-L-2000-82524 Directiva 2000/60/CE del

Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524>

Peña Guzmán, C. A., & Lara Borrero, J. (2012). TRATAMIENTO DE AGUAS DE

ESCORRENTÍA MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES: ESTADO DEL ARTE.

Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 22(2), 39-61.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0124-81702012000200003&script=sci_arttext

Planning practice guidance. (2019, julio 22). GOV.UK.

<https://www.gov.uk/government/collections/planning-practice-guidance>

Przestrzelska, K., Wartalska, K., Rosińska, W., Jurasz, J., & Kaźmierczak, B. (2024). Climate

Resilient Cities: A Review of Blue-Green Solutions Worldwide. Water Resources

Management. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03950-5>

Rau, S. (2024, April). Climate Resilient Sponge Cities—Concepts and Tools to Integrate Green-

Blue and Grey Systems. In KEEP ON PLANNING FOR THE REAL WORLD. Climate

Change calls for Nature-based Solutions and Smart Technologies. Proceedings of REAL

CORP 2024, 29th International Conference on Urban Development, Regional Planning and Information Society (pp. 123-135). CORP–Competence Center of Urban and Regional Planning. https://www.corp.at/archive/CORP2024_85.pdf

Reyes-Vidal, M. Y., Diez, Á. A., Martínez-Silva, A., & Asaff, A. (2012). Investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el cuidado y reuso del agua. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41724972009>

Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: Causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de geografía Norte Grande*, 57, 177-192. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100012>

Saussaie, B. (2020). Élaboration et instruction des dossiers relatifs à la gestion et aux rejets des eaux pluviales. https://www.driat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_technique_eaux_pluviales_couvvf-2.pdf

Secretaría Distrital de Planeación. (2021). Documento técnico de soporte. https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/dts_libroiv_instrumentos_0.pdf

Senge, T. (2022). The UN's sustainable development goal 13 in Berlin, Germany: Towards the implementation of the «sponge city» concept for climate change adaptation and mitigation. <https://repositori.upf.edu/items/4e964e56-1d3b-4b8e-9b66-42900f70d270>

Toronto and Region Conservation Authority. (2010). LID Stormwater Management Planning and Design Guide. Sustainable Technologies Evaluation Program (STEP).

<https://sustainabletechnologies.ca/home/urban-runoff-green-infrastructure/low-impact-development/low-impact-development-stormwater-management-planning-and-design-guide/>

Tucci, C. E. M. (2004). Inundaciones urbanas.

https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/14668/1/Boletin_OMM-53_1%285%29.pdf

US EPA, O. (2015, septiembre 4). Stormwater Management Practices at EPA Facilities

[Collections and Lists]. <https://www.epa.gov/greeningepa/stormwater-management-practices-epa-facilities>

Vásquez, O. (s. f.). La gestión urbana sostenible: Conceptos, rol del go- bierno local y

vinculación con el marketing urbano. <https://www.redalyc.org/pdf/555/55532603006.pdf>

Wang, Q., Luan, D., & Liu, D. (2018) The Necessity Analysis and Idea Discussion of Sponge City Construction in North China.

<https://scholar.archive.org/work/xc2loegjvzaotmgpi4ifxgig6m/access/wayback/http://dpi-proceedings.com/index.php/dtetr/article/download/29002/28017>

Washington State Department of Ecology. (2024). Recuperado 9 de diciembre de 2024, de <https://ecology.wa.gov/Regulations-Permits/Guidance-technical-assistance/Stormwater-permittee-guidance-resources/Low-Impact-Development-guidance>

Waterstaat, M. van I. en. (2022, marzo 18). Programma Noordzee 2022 – 2027—Rapport—Rijksoverheid.nl [Rapport]. Ministerie van Algemene Zaken.
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/03/18/bijlage-programma-noordzee-2022-2027>

Yu, M. M., Zhu, J. W., Gao, W. F., Xu, D. P., & Zhao, M. (2017). Urban permeable pavement system design based on “sponge city” concept. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 82(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/82/1/012027>

Yu, M. M., Zhu, J. W., Gao, W. F., Xu, D. P., & Zhao, M. (2017). Urban permeable pavement system design based on “sponge city” concept. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 82(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/82/1/012027>

Zahmatkesh, Z., Burian, S., Karamouz, M., & Tavakol, H. (2014). Low-Impact Development Practices to Mitigate Climate Change Effects on Urban Stormwater Runoff: Case Study of New York City | Journal of Irrigation and Drainage Engineering | Vol 141, No 1.
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000770](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000770)

Zeng, L., Li, R. Y. M., Zeng, H., & Song, L. (2023). Perception of sponge city for achieving circularity goal and hedge against climate change: A study on Weibo. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 16(3), 362-384.

<https://doi.org/10.1108/IJCCSM-12-2022-0155>

Zhang, C., He, M., & Zhang, Y. (2019). Urban Sustainable Development Based on the Framework of Sponge City: 71 Case Studies in China. *Sustainability*, 11(6), Article 6.

<https://doi.org/10.3390/su11061544>

Zhang, S., Li, Y., Ma, M., Song, T., & Song, R. (2018). Storm Water Management and Flood Control in Sponge City Construction of Beijing. [https://www.mdpi.com/2073-](https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/1040)

[4441/10/8/1040](https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/1040)