

# Gestión de la lluvia y escorrentía por medio de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en Tlalnepantla de Baz, Estado de México

## Management of rainfall and runoff through Sustainable Urban Drainage Systems in Tlalnepantla de Baz, State of Mexico

C. M. López-León <sup>a</sup>, O. S. Areu-Rangel <sup>a</sup>, G. A. Vázquez-Rodríguez <sup>a</sup>, L. Lizárraga-Mendiola <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

### Resumen

En este artículo se investigó el impacto que tiene la distribución espacial de sistemas de drenaje urbano (techos verdes y pavimentos permeables) por separado; al mismo tiempo, se comparó con un escenario donde estos sistemas se combinaron. Se estimó la reducción de inundaciones en una cuenca hidrográfica con altos niveles de urbanización. En la evaluación, se consideró la intensidad de precipitación y tiempos de retorno para el diseño de obras hidráulicas de alcantarillado y drenaje en zonas urbanas, así como periodos de lluvia con duración de 5 minutos, ya que las superficies de drenaje son pequeñas. Los espacios para implementación de techos verdes se consideraron como superficies homogéneas empleando el área efectiva para retención de la lluvia, así como vialidades secundarias con pavimento permeable para infiltración de la escorrentía. Se encontró que los tres escenarios analizados tienen una capacidad superior a la infraestructura hidráulica actual para gestionar la lluvia y escorrentía. La alternativa más recomendable a considerar es la combinación de estos sistemas, ya que su capacidad para aumentar la eficiencia del drenaje existente es mayor, así como su multifuncionalidad en la gestión del agua. En contraste, implementar alternativas aisladas también alivian la presión sobre la red existente, pero tienen menor capacidad de mitigación.

**Palabras Clave:** tecnologías de bajo impacto, autoconsumo de agua, recarga de acuíferos.

### Abstract

This article investigated the impact of the spatial distribution of urban drainage systems (green roofs and permeable pavements) separately; at the same time, it was compared with a scenario where these systems were combined. The reduction of floods was estimated in a hydrographic basin with high levels of urbanization. In the evaluation, the intensity of runoff and return periods were considered for the design of hydraulic sewer and drainage works in urban areas, as well as rainfall periods lasting 5 minutes, since the drainage surfaces are small. The spaces for the implementation of green roofs were considered as homogeneous surfaces using the effective area for rainfall retention, as well as secondary roads with permeable pavement for runoff infiltration. It was found that the three scenarios analyzed have a greater capacity than the current hydraulic infrastructure to manage rainfall and runoff. The most recommended alternative to consider is the combination of these systems, since their capacity to increase the efficiency of existing drainage is greater, as well as their multifunctionality in water management. In contrast, implementing isolated alternatives also relieve pressure on the existing network, but have less mitigation capacity.

**Keywords:** low impact development, water autoconsumption, aquifer recharge.

## 1. Introducción

La configuración del sistema de drenaje urbano, también conocido como alcantarillado, tiene un impacto significativo en cómo se manejan las inundaciones en áreas urbanas

densamente pobladas. En particular, se han señalado los inconvenientes asociados con los sistemas de drenaje convencionales; un ejemplo de esto son las deficiencias de drenaje con las que contaba Singapur hace 50 años, ya que el agua de lluvia y el agua importada de Malasia eran las únicas

\*Autor para la correspondencia: [mendiola@uaeh.edu.mx](mailto:mendiola@uaeh.edu.mx)

**Correo electrónico:** [lo361271@uaeh.edu.mx](mailto:lo361271@uaeh.edu.mx) (Cecilia Marlene López -León), [omar\\_areu@uaeh.edu.mx](mailto:omar_areu@uaeh.edu.mx) (Omar Salvador Areu-Rangel), [gvazquez@uaeh.edu.mx](mailto:gvazquez@uaeh.edu.mx) (Gabriela A. Vázquez-Rodríguez), [mendiola@uaeh.edu.mx](mailto:mendiola@uaeh.edu.mx) (Liliana Lizárraga-Mendiola).

**Historial del manuscrito:** recibido el 28/04/2024, última versión-revisada recibida el 26/07/2024, aceptado el 22/08/2024, en línea (postprint) desde el 23/09/2024, publicado el 05/07/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13i25.12898>



formas de obtener el vital líquido (Aguas Residuales.INFO, 2016). Otro ejemplo se encuentra en Barranquilla, Colombia, donde la habitual presencia de intensas lluvias convectivas locales transforma las calles principales de la ciudad en verdaderos ríos urbanos, caracterizados por altos niveles de agua y rápidas corrientes. Estas inundaciones son el resultado de una concentración urbana densa que ha ignorado la preservación del drenaje natural y la protección ambiental de los arroyos que recorren la ciudad, sumado a errores en las normativas de uso del suelo urbano (Arroyo, 2016).

Desafíos como los anteriores han llevado a explorar alternativas más sostenibles. Una de esas alternativas es la implementación de los SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible), que se basan en el ciclo natural del agua en entornos urbanos (Castro-Fresno et al., 2005). Los SUDS son sistemas diseñados para gestionar eficazmente el agua de lluvia en zonas urbanas con el fin de mejorar la calidad del agua y disminuir los efectos de las inundaciones. Los SUDS emplean técnicas que imitan los procesos naturales para absorber, recolectar, almacenar y limpiar el agua de lluvia antes de que se libere de nuevo al medio ambiente o al sistema de drenaje (SUDS S.I., 2003).

Los SUDS deben implementarse según el contexto específico, como el clima, la topografía y la densidad urbana. Sin embargo, algunos de los tipos más utilizados en zonas urbanas incluyen: a) Pavimentos permeables, que permiten que el agua de lluvia se infiltre a través de ellos hacia un lecho de almacenamiento subyacente, donde puede ser absorbida lentamente por el suelo o redirigida. Su capacidad de infiltración puede llegar a 1.2 mm/hora o más, dependiendo de la profundidad del nivel freático (SUDS S.I., 2003); b) Techos verdes, que pueden retener entre el 50% y el 90% del agua de lluvia que reciben, dependiendo del tipo de vegetación, la profundidad del sustrato y las condiciones climáticas (SUDS S.I., 2003).

En Madrid, España, se llevó a cabo una intervención en el Parque Gómez Narro para abordar problemas de erosión y empozamientos provocados por las precipitaciones y las pendientes pronunciadas del terreno. Se optó por reemplazar el pavimento impermeable por pavimento permeable sobre celdas de drenaje, junto con la instalación de cajas modulares de polipropileno para facilitar la infiltración del agua. Además, se realizó una completa revegetación del parque. Estas medidas contribuyeron a reducir la erosión, evitar los empozamientos y mejorar tanto la calidad ambiental como la integración paisajística (SUDS S.I., 2003).

En Tokio, Japón, se construyó el proyecto G-Cans para prevenir inundaciones causadas por lluvias intensas y desastres naturales. Este proyecto incluye un sistema de canalizaciones, un tanque principal de 78 m de profundidad, 5 silos conectados por túneles a lo largo de 6.4 km y 59 columnas conectadas a bombas de 10MW para evacuar el agua hacia el río Edogawa. Aunque no se clasifica como un SUDS, el proyecto G-Cans representa un ejemplo destacado de ingeniería sofisticada que ha contribuido significativamente a mitigar los daños por inundaciones en Tokio (Amorocho-Daza, 2016).

De acuerdo con investigaciones realizadas por la ONU (2018), el 55% de la población global residía en áreas urbanas, y se anticipa un incremento de hasta 13% para el año 2050. Este crecimiento ha ocasionado la impermeabilización de extensas áreas de terreno debido a la expansión de la

construcción de edificaciones, carreteras y otras infraestructuras urbanas. Esta tendencia hacia la urbanización ha reducido las superficies con alta permeabilidad, lo que ha generado una marcada discrepancia entre el ciclo hidrológico urbano y el ciclo natural que se observa en entornos no urbanizados. Esta disparidad se manifiesta en una disminución en el proceso de infiltración del agua en el suelo, que provoca un incremento superior al 55% en el escurrimiento superficial (Rodríguez-Bayón et al., 2009).

En este contexto, en el Valle de México, la modificación de los cauces naturales ha conducido a que las aguas, anteriormente dirigidas hacia el lago de Texcoco, sean ahora canalizadas por cauces urbanos hasta el valle del Mezquital. Esta práctica ha contribuido a la disminución en la recarga del acuífero de la cuenca del valle de México, lo que ha resultado en la desaparición del lago de Texcoco (Courty, 2021).

En el caso particular de Tlalnepantla de Baz, se ha registrado la ocurrencia de inundaciones recurrentes en el Blvd. Manuel Ávila Camacho y Av. De los Maestros, en la zona oeste del municipio. Las lluvias torrenciales que se presentan en la zona son responsables de inundaciones que alcanzan niveles significativos en un corto periodo, con incrementos de más de 40 centímetros en el nivel del agua. Esta situación representa una amenaza tanto para automovilistas como para los residentes (Jiménez, 2023). De acuerdo con la topografía del municipio, el agua pluvial que no logra desalojarse por el sistema de drenaje existente, se dirige al suroeste por Av. De los Maestros, llega al Blvd. Manuel Ávila Camacho y se distribuye por el periférico (Jiménez, 2024).

La estrategia delineada para el desarrollo de este proyecto tiene como propósito identificar los criterios necesarios para la ubicación y selección del tipo de SUDS más recomendable a las condiciones locales del área, con el objetivo de contribuir con la mitigación de las inundaciones mediante la retención y ralentización de la escorrentía generada por las precipitaciones en una microcuenca en la ciudad de Tlalnepantla de Baz, Estado de México.

### *1.1. SUDS para gestión del agua*

En la construcción de un sistema de techos verdes, se identifican componentes esenciales que se detallan en un orden específico. En el contexto de las cubiertas naturadas modulares, los módulos pre cultivados se disponen sobre una membrana impermeabilizante anti-raíz. En situaciones donde los módulos no cuentan con una capa drenante y filtrante incorporada, estas deben ser integradas al sistema. Los elementos incluidos son: soporte estructural, soporte base, desagües, membrana impermeabilizante anti-raíz, capa drenante, capa filtrante, capa de sustrato y capa de vegetación (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018).

Los techos verdes ofrecen una solución efectiva para mitigar inundaciones al retener el agua durante lluvias intensas y reducir la escorrentía superficial. Funcionan como una barrera natural que ralentiza el flujo de agua hacia los sistemas de drenaje, lo que ayuda a prevenir desbordamientos. Además, al filtrar y purificar el agua, contribuyen a mejorar su calidad. No obstante, es importante tener en cuenta que su efectividad puede verse influenciada por las condiciones locales y el diseño específico del techo

verde. Cuando se eligen techos verdes como opción para mitigar la escorrentía generada por las lluvias, es esencial tener en cuenta diversos aspectos. Entre estos, se encuentran la capacidad de retención de agua, la eficacia del sistema de drenaje para evitar el estancamiento, la calidad de la capa impermeabilizante para prevenir filtraciones, la selección adecuada de plantas y sustrato para asegurar resistencia a la humedad y facilitar el drenaje, la evaluación de las condiciones climáticas y topográficas del entorno, así como la infraestructura existente en la zona. Además, resulta fundamental analizar detenidamente tanto su costo inicial como el mantenimiento a largo plazo (Secretaría Administrativa UNAM, 2010).

En cuanto a los pavimentos permeables, la estructura que se recomienda para su buen funcionamiento consiste en: a) una superficie de rodamiento que permita la entrada del agua, hecha de distintos materiales como asfalto, concreto poroso, arcilla, grava o pasto; b) una base de material granular fino que sostenga la capa superior de forma adecuada; c) una capa inferior formada por un entramado de material granular grande o módulos plásticos (geo-células), diseñados para almacenar agua. Este diseño permite que la sub-base pueda tanto infiltrar como retener el agua, ya sea de forma parcial o total (Cárdenas-Gutiérrez et al., 2017).

Al considerar pavimentos permeables como medida de mitigación de inundaciones, es esencial evaluar su capacidad para permitir la infiltración del agua en el suelo y verificar que posean una estructura porosa eficiente. Además, se debe seleccionar un pavimento resistente y duradero capaz de soportar el tráfico y las condiciones climáticas. Es importante también tener en cuenta los requisitos de mantenimiento para garantizar su eficacia a largo plazo. Por último, se debe evaluar su integración con el entorno y su viabilidad económica en términos de costos iniciales y de mantenimiento (Cárdenas-Gutiérrez et al., 2017). Los pavimentos permeables son eficaces en la mitigación de inundaciones al permitir que el agua de lluvia se infiltre en el suelo en lugar de generar escorrentía superficial. Esto reduce el riesgo de desbordamientos, alivia la carga en los sistemas de drenaje y contribuye a recargar acuíferos. Sin embargo, su efectividad puede variar según el diseño, mantenimiento y condiciones locales (Cárdenas-Gutiérrez et al., 2017).

## 2. Descripción de área de estudio.

Tlalnepantla de Baz está situado en el nororiente del Estado de México, tal como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1: Ubicación del municipio de Tlalnepantla de Baz (Soy Mexiquense, s.f.).

### 2.1. Clima de Tlalnepantla de Baz

El municipio de Tlalnepantla de Baz presenta dos tipos de clima. Uno de ellos es templado subhúmedo con lluvias en verano, caracterizado por una humedad media del 83.29%. El otro tipo de clima también es templado subhúmedo con lluvias en verano, pero con una humedad media del 16.71% (CLIMA, 2020). En cuanto a las precipitaciones, este municipio experimenta un rango anual que varía entre 500 y 800 mm, con una temperatura promedio anual de 16.5 °C y una mínima anual de 10.3 °C (CLIMA, 2020).

### 2.2. Tipo de suelo

Los suelos permeables facilitan la infiltración de manera más eficaz, mientras que los suelos más compactos pueden requerir enfoques alternativos, como la instalación de pavimentos permeables o la aplicación de técnicas que promuevan la infiltración artificial (Jiménez y Joya, 2015). En la zona plana, el suelo predominante es el Regosol, acompañado de Litosol y afloramientos de rocas de tepetate (Gaceta Municipal del Ayuntamiento de Tlalnepantla de Baz, 2019). En comparación con otros suelos de composición similar, la permeabilidad promedio es de  $8.3 \times 10^{-3}$  m/d (Álvarez-Manilla-Aceves et al., 2002). Es relevante mencionar que el suelo Litosol, caracterizado por su composición rocosa, tiene una profundidad media menor de 10 cm (Álvarez-Manilla-Aceves et al., 2002).

### 2.3. Obras de drenaje existentes

La planificación de la infraestructura urbana y la disposición de áreas impermeables son aspectos cruciales que influyen en la ubicación y diseño de los SUDS. Resulta fundamental identificar estratégicamente lugares que optimicen la eficiencia del sistema, mediante propuestas de drenaje complementarias (Figuras 2 y 3).



Figura 2: existente

boulevard Manuel Ávila Camacho. Izquierda: alcantarilla en buen estado; derecha: alcantarilla con azolve en 100% (fuente propia).



Figura 3: Plaza comercial sobre boulevard Manuel Ávila Camacho, probable propuesta para colocar pavimento permeable (fuente propia).

Dado que actualmente no se cuenta con cartografía pública de la localidad, se incluyen algunas imágenes para identificar las alcantarillas en la vialidad principal de la zona de estudio y posibles sitios estratégicos para la implementación de SUDS, como se detalla en la Figura 2 y se complementa con la Figura 3.

### 3. Metodología

#### 3.1. Introducción

La infraestructura hidráulica incluye sistemas y estructuras diseñadas para gestionar y controlar el agua, ya sea para su uso, almacenamiento, distribución, tratamiento o control de inundaciones. Es esencial para asegurar el acceso a agua potable, gestionar recursos hídricos, prevenir inundaciones y proteger el medio ambiente. Esta infraestructura comprende diferentes tipos necesarios en instalaciones de alcantarillado, agua potable y drenaje (Egea-Pérez, 2018). Cuando estos son insuficientes para gestionar el agua pluvial, es recomendable adaptar obras complementarias como los SUDS.

#### 3.2. Criterios para implementar los SUDS

##### 3.2.1. Techos verdes

Los techos verdes son estructuras compuestas por varias capas de vegetación instaladas en la parte superior de los techos o terrazas de los edificios (Figura 4). Estos sistemas tienen como objetivo principal retener el agua de lluvia, lo que contribuye a reducir el flujo máximo de agua y, al mismo tiempo, actúan como aislantes térmicos para los edificios.

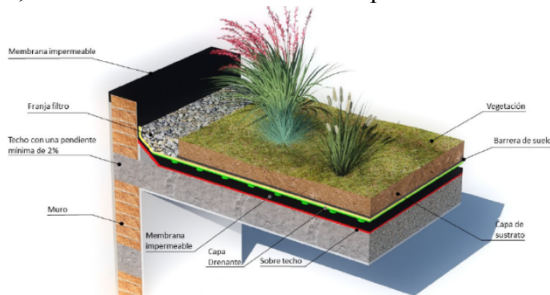


Figura 4: Componentes de un techo verde (IMPLAN, 2019).

Según las directrices del Instituto Municipal de Planeación de Hermosillo (IMPLAN, 2019), un techo verde típico consta de varios componentes: la techumbre, que debe ser lo suficientemente resistente para soportar la carga de todas las capas vegetales (mínimo 78 kg/m<sup>2</sup>); la membrana impermeable, que protege la estructura del techo de la humedad; la capa drenante, que permite el drenaje del agua no absorbida por las plantas (con una porosidad mínima del 25% y un espesor mínimo de 2 cm); la barrera de suelo, que evita que las partículas finas ingresen a la capa drenante (con un espesor mínimo de 2 mm); la capa de sustrato, que sostiene las plantas y retiene el agua (con un espesor mínimo de 10 cm para sistemas extensivos y un máximo de 20 cm; en

el caso de sistemas intensivos, un mínimo de 20 cm); la vegetación, seleccionada de acuerdo con las condiciones climáticas y la estructura del techo; el sistema de drenaje, que evacua el exceso de agua del techo (con tuberías de diámetro mínimo de 10 cm); y, finalmente, la franja de filtro, compuesta por material granular grueso con un espesor mínimo de 20 cm, para garantizar un adecuado funcionamiento del sistema (IMPLAN, 2019).

##### 3.2.2. Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables se refieren a áreas o superficies pavimentadas destinadas al tránsito de vehículos o peatones, pero que también posibilitan la infiltración del agua hacia su interior (Figura 5). Allí, el agua puede ser almacenada para su uso posterior o infiltrarse en el suelo, lo que contribuye a la recarga de los acuíferos (Perales-Momparler y Doménech, 2008). Un pavimento permeable, según IMPLAN (2019), incluye varios componentes. En primer lugar, la superficie de rodamiento puede ser permeable o porosa para facilitar la infiltración del agua, con un espesor que varía entre 5 y 7 cm para pavimentos porosos, y entre 15 y 20 cm para pavimentos permeables. La estructura del pavimento debe contener entre un 20% y un 40% de vacíos, los cuales son creados por grava gruesa de 3/4" y balastro de 1.5" a 3", con un espesor de 15 a 35 cm. Además, se incluye una barrera de suelo fabricada con geotextil de poliéster de 200 gr/m<sup>2</sup>, que ayuda a prolongar la durabilidad del pavimento, con un espesor mínimo de 2 mm (IMPLAN, 2019).

Los pavimentos permeables pueden reducir la escorrentía, prevenir inundaciones y mejorar la calidad del agua al filtrar contaminantes, además de recargar los acuíferos, lo que ayuda a mantener los niveles de agua subterránea. También, ayudan a ahorrar agua al capturarla para su reutilización en riego u otros usos no potables y tienen un diseño versátil, adaptable a diferentes entornos y aplicaciones (Cárdenas-Gutiérrez et al., 2017).

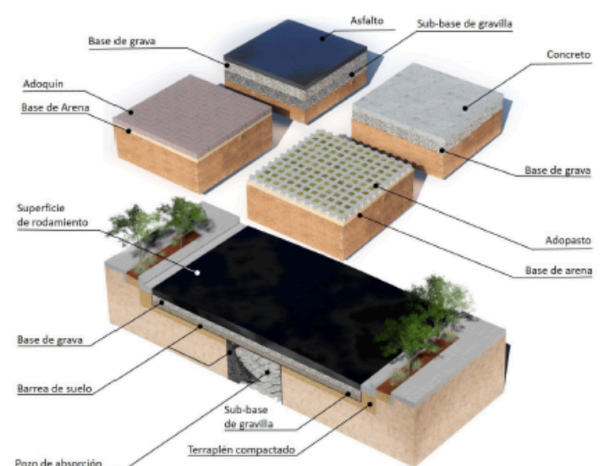


Figura 5: Ejemplos de pavimentos permeables (IMPLAN, 2019).

#### 3.3. Capacidad de retención e infiltración de los SUDS

El objetivo principal de los SUDS es mitigar los impactos negativos de la escorrentía pluvial, reduciendo las inundaciones. Al mismo tiempo, contribuyen a la recarga de los acuíferos y mejoran la calidad del agua (Saltos, 2020).



La capacidad de retención e infiltración de los techos verdes depende en gran medida de las características de los materiales, la porosidad de los mismos y la vegetación que se elige. En la Tabla 1 se muestran los parámetros según el tipo de sistema de techo verde que se desee construir (extensivo, semi-extensivo o intensivo). También, se debe considerar la pendiente que el sistema debe poseer; se recomienda una pendiente mínima de 2% y, para superficies inclinadas con pendiente superior al 15%, se implementarán protecciones contra deslizamientos (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018).

Tabla 1: Parámetros para cada tipo de sistema de techos verdes (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018).

| Parámetros del sistema de techo verde | Extensivo                            | Semi-extensivo o                          | Intensivo                              |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| Espesor del sustrato                  | Hasta 18 cm                          | Hasta 30 cm                               | Mayor a 40 cm                          |
| Carga adicional                       | De 110 y hasta 200 kg/m <sup>2</sup> | Mayor a 200 y hasta 350 kg/m <sup>2</sup> | Mayor a 350 kg/m <sup>2</sup>          |
| Tipo de vegetación                    | Suculentas                           | Suculentas, pastos y arbustos             | Suculentas, pastos, arbustos y árboles |
| Altura de crecimiento de plantas      | 5 – 50 cm                            | 5 – 100 cm                                | 5 – 400 cm                             |
| Diámetro de copa                      | No aplica                            | No aplica                                 | 300 cm máx.                            |

La capa drenante de los techos verdes debe ser capaz de desalojar una pluviometría de 2 L/min x m<sup>2</sup> de intensidad (300 L/s x ha) y la capa filtrante debe colocarse sobre la superficie total de la capa drenante con un traslape mínimo de 15 cm; deberá sobresalir mínimo 10 cm por encima de la superficie del sustrato y deberá permitir el paso de 2 L/min x m<sup>2</sup>, con un peso mínimo de 200 g/m<sup>2</sup>. La capa de sustrato cumple una función fundamental al proporcionar soporte físico a la vegetación, suministrándole nutrientes, agua y oxígeno esenciales para su crecimiento. Además, es el medio donde las raíces de las plantas se desarrollan (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018). El espesor de esta capa depende de las necesidades del volumen radicular de las especies seleccionadas y de las condiciones micro climáticas locales, especialmente la demanda de evapotranspiración. Se recomienda que el espesor mínimo de esta capa sea de 10 cm para asegurar un adecuado crecimiento de las plantas. Para la capa de vegetación es imprescindible seleccionar una variedad de plantas que requieran un bajo mantenimiento y puedan adaptarse a las condiciones extremas del entorno donde serán colocadas. Estas plantas deben permitir un rápido y duradero establecimiento de la cobertura vegetal (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018).

Por otro lado, la capacidad de absorción de los pavimentos permeables varía según su estructura. En general, estos pavimentos constan de tres capas principales: una capa superior de rodadura que facilita la entrada de agua, compuesta por materiales como asfalto, concreto poroso, arcilla, grava o pasto; una capa base de material granular fino que asegura la adecuada instalación de la capa de rodadura; y una capa de almacenamiento de agua, compuesta por una

matriz de material granular de gran tamaño o por módulos plásticos conocidos como geo-células, que permite retener el agua (sub-base) (Cárdenas-Gutiérrez et al., 2017).

Los suelos permeables, constituidos principalmente por arena, facilitan una mejor infiltración y retención de agua en comparación con suelos ricos en limos y arcillas (Robles-Rivera, 2015). Además, la vegetación y los materiales de construcción también juegan un papel crucial en la capacidad de retención y filtración. Las plantas tienen la capacidad de absorber el agua y reducir la escorrentía, mientras que el uso de materiales permeables para pavimentos porosos y revestimientos permeables, en lugar de superficies impermeables tradicionales, puede aumentar la infiltración del agua (Saltos, 2020).

#### 3.4. Ubicación de obras de drenaje pluvial y alcantarillado existentes

La disposición de la infraestructura urbana y la distribución de las áreas impermeables influyen en la ubicación y el diseño de los SUDS. Debido a la falta de disponibilidad de cartografía actualizada de la localidad, se incluyen algunas imágenes para la identificación de alcantarillas en las vialidades de estudio, así como para señalar lugares estratégicos propuestos para la implementación de SUDS. Cabe mencionar que las obras de drenaje pluvial se encuentran apropiadamente ubicadas según los criterios básicos de diseño requeridos, pero presentan un azolve muy alto, lo que imposibilita su correcto funcionamiento. Sobre la Av. De los Maestros, se contempla la propuesta de un parque de lluvia como se muestra en la Figura 5; la Figura 6 hace referencia al azolve que se acumula en las alcantarillas.



Figura 5: Alcantarillado sobre vialidad (fuente propia).



Figura 6: Drenaje sobre Av. De los maestros. Izquierda: alcantarilla con azolve del 70%, derecha: alcantarilla en buen estado (fuente propia).

### 3.5. Identificación de factores físicos y selección de SUDS como obras complementarias

La elección de SUDS se ve afectada por una variedad de factores físicos que deben tenerse en cuenta para asegurar la eficacia y la integración adecuada de estas soluciones en un entorno urbano (Zeyu, 2022). Algunos de los factores físicos más relevantes incluyen:

#### 3.5.1. Topografía de la zona de estudio

La ciudad de Tlalnepantla de Baz, con su diversidad topográfica, presenta desafíos y oportunidades únicas en este contexto. El punto más alto de la ciudad se encuentra en la cumbre del cerro del Valle Dorado, a 2 440 metros sobre el nivel del mar, mientras que la elevación más baja se registra en el centro urbano, a 2 260 metros. Esta variación en altitudes representa una pendiente de 4.3%.

#### 3.5.2. Delimitación de la cuenca hidrográfica

Por medio de las cartas topográficas disponibles se generó la representación gráfica de la cuenca hidrográfica del área de estudio (Figura 7).

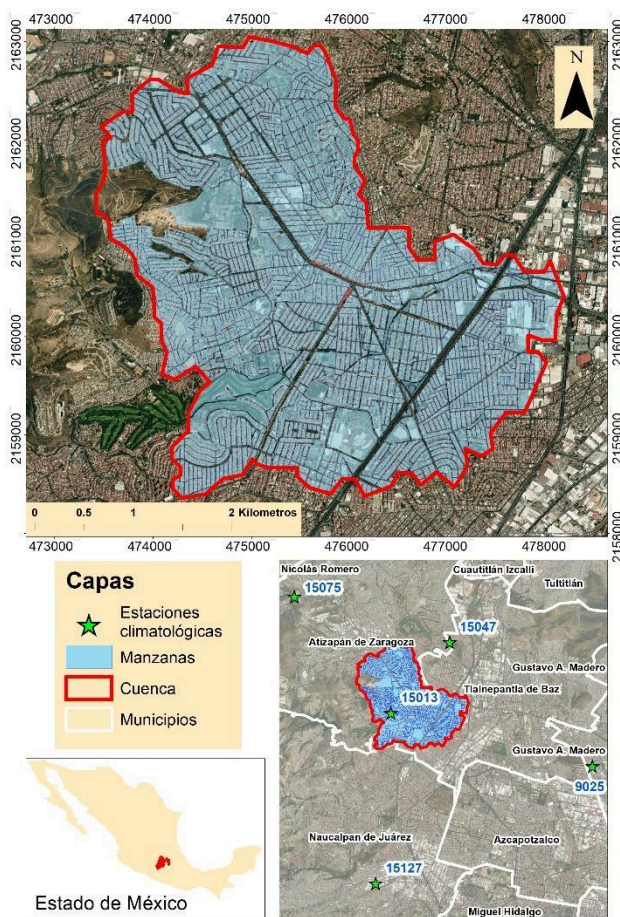


Figura 7: Delimitación de la cuenca del área de estudio y ubicación de estaciones climatológicas (fuente propia).

Las elevaciones en estas áreas varían desde los 2 240 a 2 650 metros sobre el nivel del mar en la Sierra de Guadalupe, hasta 2 250 metros en la planicie, de acuerdo con información

del Órgano Oficial del Ayuntamiento de Tlalnepantla de Baz (2019).

#### 3.5.3. Tiempos de retorno

Para efectuar el análisis y diseño de los SUDS en este estudio, resulta esencial determinar los tiempos de retorno (TR) de las precipitaciones. Para ello, se recopilaban datos de las lluvias máximas anuales registradas en las estaciones climatológicas ubicadas en la Figura 7. Después, se usó el software Matlab (versión R2024a, proveedor MathWorks) para organizar los datos y generar gráficas que representen las curvas de lluvias máximas diarias con TR de 5 y 10 años en un lapso de 5 minutos. Se consideró esta duración ya que los SUDS propuestos se adaptan para áreas de drenaje pequeñas, y a que en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (CONAGUA, 2019), se recomiendan para obras de alcantarillado y drenaje en zonas densamente urbanizadas.

Estos TR (5 y 10 años) representan una probabilidad de ocurrencia de 20 y 10%, respectivamente. Esto posteriormente se empleó para generar las isoyetas de intensidad-duración-frecuencia que delimitan espacialmente

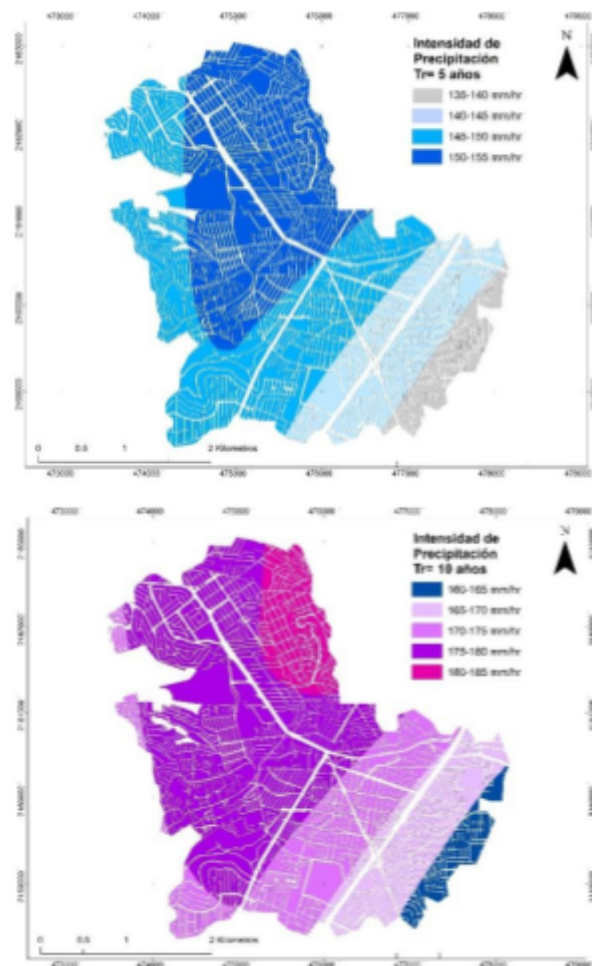


Figura 8: Delimitación espacial de las intensidades de precipitación. Arriba: TR = 5 años. Abajo: TR = 10 años (fuente propia).

La intensidad de precipitación estimada para el área de estudio se compiló en la Tabla 2 a partir de los datos obtenidos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2022). Una vez contando con la información hidrológica, se establecieron criterios técnicos a tomar en cuenta respecto a las superficies de intervención con techos verdes y pavimentos permeables. Según los criterios de diseño urbano de la NMX-AA-164-SCFI-2013 (Secretaría de Economía, 2013), se debe tener en cuenta que, para los techos verdes, se dejará libre 18 m<sup>2</sup> en techos de viviendas para el área de servicios y un 30% del área total de los techos para azoteas que no forman parte de una vivienda.

Para el cálculo de áreas efectivas para el aprovechamiento del agua pluvial, se consideraron viviendas de interés social (75 m<sup>2</sup>), dado que la distribución de las manzanas en la zona no es homogénea. De esta superficie, el 30% se dejó libre como espacio para servicios (tinaco, gas estacionario); por lo tanto, el área efectiva por vivienda considerada en este análisis será de 57 m<sup>2</sup>.

Tabla 2: Intensidad de precipitación mm/h para tiempos de retorno de 5 y 10 años (SCT, 2022).

| TC     | I (TR 5) | I (TR 10) |
|--------|----------|-----------|
| Min.   | (mm/h)   | (mm/h)    |
| 5.00   | 120.00   | 160.00    |
| 10.00  | 100.00   | 120.00    |
| 15.00  | 75.00    | 100.00    |
| 20.00  | 65.00    | 80.00     |
| 30.00  | 55.00    | 65.00     |
| 40.00  | 50.00    | 60.00     |
| 60.00  | 40.00    | 45.00     |
| 90.00  | 30.00    | 35.00     |
| 120.00 | 30.00    | 30.00     |
| 50.00  | 25.00    | 25.00     |
| 180.00 | 24.00    | 25.00     |
| 210.00 | 20.00    | 20.00     |
| 240.00 | 20.00    | 20.00     |

Esta superficie se multiplicó por un coeficiente de escurrimiento (0.9 para azoteas de concreto, 0.58 para techos verdes; Versini et al., 2015), así como por la intensidad de lluvia correspondiente (Figura 8). En el caso de las vialidades, solamente se consideraron las calles secundarias donde no es común el tránsito de vehículos pesados. En estas vialidades, se consideró un coeficiente de escurrimiento para pavimento asfáltico (0.95) y para pavimento permeable (0.7; de Sales-Braga et al., 2022). Para estimar la escorrentía pico se utilizó la ecuación 1 (Ramírez-Ambríz, 2017). Esto permitió además obtener el volumen de agua interceptada a través de estas propuestas.

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3.6} \quad (1)$$

Donde: Q es la escorrentía pico (m<sup>3</sup>/s); C, el coeficiente de escurrimiento (adimensional); I, intensidad de precipitación (mm/h); A, el área de drenaje de la cuenca (km<sup>2</sup>); 3.6 es un factor de conversión de las unidades.

#### 4. Resultados y discusión

A partir de la Figura 8, se analizaron tres escenarios para evaluar cómo las propuestas de intervención en azoteas (con

techos verdes) y vialidades (pavimento permeable) pueden gestionar la escorrentía urbana de manera sostenible. En primer lugar, se consideró el escenario donde la precipitación se intercepta a través de techos verdes instalados en azoteas. En segundo lugar, se tomó en cuenta únicamente la captación e infiltración de la escorrentía que logran mitigar los pavimentos permeables en vialidades secundarias. Por último, por medio del tercer escenario se analizó la eficacia de captación e infiltración de las precipitaciones y escorrentía al combinar techos verdes y pavimentos permeables.

A continuación, se desglosan las capacidades hidrológicas de estas propuestas y se analizan posibilidades para su implementación en las áreas espacialmente más favorables a través de la cuenca.

##### 4.1. Escenario con techos verdes

De acuerdo con los resultados de la Tabla 3, se aprecia que para el TR = 5 años, las mejores condiciones hidrológicas se concentran en la zona con intensidades entre 150-155 mm/h, localizada en la parte centro-norte de la cuenca (Figura 8).

Tabla 3: Condiciones hidrológicas para techos verdes.

| Escenario con techos verdes, TR = 5 años      |                        |                                 |                             |                                         |
|-----------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Rango de intensidades de precipitación (mm/h) | Área (m <sup>2</sup> ) | Área efectiva (m <sup>2</sup> ) | Gasto Q (m <sup>3</sup> /s) | Volumen total de agua (m <sup>3</sup> ) |
| 135-140                                       | 620 270                | 329 983.64                      | 4.78                        | 1 436.80                                |
| 140-145                                       | 1 711 984              | 910 775.49                      | 13.69                       | 4 109.87                                |
| 145-150                                       | 3 630 619              | 1 931 489.3                     | 30.07                       | 9 021.66                                |
| 150-155                                       | 3 798 004              | 2 020 538.1                     | 32.52                       | 9 757.51                                |
| <b>Total</b>                                  | <b>9 760 877</b>       | <b>5 192 786.6</b>              | <b>81.08</b>                | <b>24 325.85</b>                        |
| Escenario con techos verdes, TR=10 años       |                        |                                 |                             |                                         |
| 160-165                                       | 447 344.9              | 237 987.48                      | 4.08                        | 1 224.64                                |
| 165-170                                       | 1 342 473              | 714 195.72                      | 12.62                       | 3 788.21                                |
| 170-175                                       | 2 128 060              | 1 132 128                       | 20.61                       | 6 184.24                                |
| 175-180                                       | 4 943 781              | 2 630 091.6                     | 49.27                       | 14 783.30                               |
| 180-185                                       | 899 217.7              | 478 383.84                      | 9.21                        | 2 764.65                                |
| <b>Total</b>                                  | <b>9 760 877</b>       | <b>5 192 786.7</b>              | <b>95.81</b>                | <b>28 745.07</b>                        |

Esta superficie tiene un área efectiva equivalente al 20.70% de la superficie de la cuenca. El volumen aprovechable de la escorrentía por medio de los techos verdes aquí comprende el 40.11% del volumen total escurrido en la cuenca. En cuanto a los resultados para el TR = 10 años, las condiciones hidrológicas más apropiadas se concentran en la zona con intensidades entre 175 y 180 mm/h. Se localiza en la parte centro-noroeste de la cuenca y comprende el 26.94% del área efectiva respecto a la superficie total de la cuenca. En esta zona el volumen aprovechable es superior que para el TR = 5 años, pues para 10 años el volumen aprovechable es del 51.43%.

##### 4.2. Escenario con pavimentos permeables

Para el caso de pavimentos permeables, la zona que más se vería beneficiada con un  $TR = 5$  años para el aprovechamiento del agua pluvial, sería la que cuenta con intensidades que van de 145 a 150 mm/h, según los resultados de la Tabla 4. Esta zona se ubica en la parte centro-sur de la cuenca (Figura 8). Aquí se reduciría la escorrentía en un 39.43% sobre el 21.03% del área total de la cuenca. Para un  $TR = 10$  años, este escenario indica que su eficiencia aumentó, ya que para el intervalo de intensidades entre 175-180 mm/h, el pavimento permeable cubre una superficie efectiva equivalente al 51.04% del área de la cuenca e intercepta el 51.83% de la escorrentía por medio de su infiltración.



Tabla 4: Condiciones hidrológicas para pavimento permeable.

| Escenario con pavimento permeable, TR= 5 años  |                        |                                 |                             |                                         |
|------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Rango de intensidades de precipitación (mm/h)  | Área (m <sup>2</sup> ) | Área efectiva (m <sup>2</sup> ) | Gasto Q (m <sup>3</sup> /s) | Volumen total de agua (m <sup>3</sup> ) |
| 135-140                                        | 763 320.8              | 406 086.68                      | 13.95                       | 4 187.76                                |
| 140-145                                        | 2 370 368              | 1 261 036                       | 44.92                       | 13 477.32                               |
| 145-150                                        | 5 242 329              | 2 788 919                       | 102.84                      | 30 852.41                               |
| 150-155                                        | 4 883 609              | 2 598 079.8                     | 99.05                       | 29 715.53                               |
| <b>Total</b>                                   | <b>13 259 627</b>      | <b>7 054 121.5</b>              | <b>260.77</b>               | <b>78 233.04</b>                        |
| Escenario con pavimento permeable, TR= 10 años |                        |                                 |                             |                                         |
| 160-165                                        | 546 500.2              | 290 738.13                      | 11.81                       | 3 543.37                                |
| 165-170                                        | 1 899 097              | 1 010 319.6                     | 42.30                       | 12 692.13                               |
| 170-175                                        | 2 899 604              | 1 542 589.1                     | 66.52                       | 19 957.24                               |
| 175-180                                        | 6 768 125              | 3 600 642.3                     | 159.77                      | 47 933.55                               |
| 180-185                                        | 1 146 301              | 609 832.31                      | 27.82                       | 8 347.07                                |
| <b>Total</b>                                   | <b>13 259 627</b>      | <b>7 054 121.5</b>              | <b>308.24</b>               | <b>92 473.38</b>                        |

#### 4.3. Escenario con propuestas combinadas

Al analizar el escenario que considera las propuestas combinadas para el aprovechamiento del agua, techos verdes y pavimento permeable, se observó que el TR = 5 años presentó menor eficiencia que el TR = 10 años (Tabla 5).

Tabla 5: Condiciones hidrológicas para las propuestas combinadas.

| Escenario con propuestas combinadas, TR= 5 años  |                        |                                 |                             |                                         |
|--------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Rango de intensidades de precipitación (mm/h)    | Área (m <sup>2</sup> ) | Área efectiva (m <sup>2</sup> ) | Gasto Q (m <sup>3</sup> /s) | Volumen total de agua (m <sup>3</sup> ) |
| 135-140                                          | 143 050.8              | 76 103.03                       | 2.0347                      | 610.41                                  |
| 140-145                                          | 658 384.4              | 350 260.51                      | 9.7051                      | 2 911.54                                |
| 145-150                                          | 1 611 710              | 857 429.71                      | 24.5916                     | 7 377.46                                |
| 150-155                                          | 1 085 605              | 577 541.63                      | 17.1257                     | 5 137.71                                |
| <b>Total</b>                                     | <b>3 498 750</b>       | <b>1 861 334.9</b>              | <b>53.45</b>                | <b>16 037.13</b>                        |
| Escenario con propuestas combinadas, TR= 10 años |                        |                                 |                             |                                         |
| 160-165                                          | 99 155.34              | 52 750.64                       | 1.66                        | 500.03                                  |
| 165-170                                          | 556 623.7              | 296 123.83                      | 9.64                        | 2 893.37                                |
| 170-175                                          | 771 543.4              | 410 461.1                       | 13.76                       | 4 130.26                                |
| 175-180                                          | 1 824 344              | 970 550.77                      | 33.49                       | 10 049.24                               |
| 180-185                                          | 247 083.6              | 131 448.47                      | 4.66                        | 1 399.37                                |
| <b>Total</b>                                     | <b>3 498 750</b>       | <b>1 861 334.8</b>              | <b>63.24</b>                | <b>18 972.29</b>                        |

Para el TR = 5 años, este escenario es capaz de interceptar el 46.0% del volumen total de la cuenca en la parte centro-oeste (con intensidades que oscilan entre 175-180 mm/h), y abarca una superficie efectiva equivalente al 46.06% de la superficie total. Para el TR = 10 años, esta eficiencia aumentó, ya que para intensidades entre 175-180

mm/h, la zona centro-noroeste es capaz de interceptar el 52.97% del volumen total en una superficie efectiva equivalente al 52.14% del área de la cuenca.

De los resultados anteriores, se aprecia que en los tres escenarios analizados la mejor alternativa para su implementación y diseño es considerando tiempos de retorno de 10 años. También, es destacable que el escenario combinado resultó ser la mejor alternativa para los dos tiempos de retorno empleados en este análisis (5 y 10 años). Lo anterior se refleja en que, tanto las superficies efectivas impactadas por la combinación de techos verdes y pavimento permeable para la gestión de la lluvia y la escorrentía, así como el volumen interceptado en este escenario, comprenden los mayores porcentajes obtenidos.

Las condiciones actuales de la cuenca dejan clara la necesidad de buscar alternativas sostenibles para aprovechar el agua de lluvia, ya que la alta impermeabilidad actualmente produce inundaciones en la parte baja de la cuenca, lo que afecta a la población e infraestructura. En la Tabla 6 se sintetizan los datos analizados para los dos tiempos de retorno empleados (TR = 5 y TR = 10 años) sin las intervenciones con SUDS.

Tabla 6: Condiciones hidrológicas actuales en la cuenca sin intervenciones.

| TR (años) | Infiltración              |                           | Esguerrimiento superficial |                           |
|-----------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
|           | Gasto (m <sup>3</sup> /s) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Gasto (m <sup>3</sup> /s)  | Volumen (m <sup>3</sup> ) |
| 5         | 87.372                    | 26 211.7                  | 457.27                     | 137 182.29                |
| 10        | 103.28                    | 30 982.9                  | 540.51                     | 162 152.85                |

De acuerdo con estos valores, solo el 0.16% de la escorrentía urbana logra infiltrarse a través de las superficies pavimentadas (con asfalto), mientras que únicamente el 0.84% de la escorrentía sería volumen aprovechable (ya que el restante se descarga hacia la red de alcantarillado y drenaje). Estos porcentajes son independientes del tiempo de retorno, ya que las condiciones de impermeabilidad son las mismas, con lo que se confirma el gran potencial que propuestas sostenibles como los SUDS representan para este tipo de condiciones urbanas.

Los SUDS se han adoptado en diversas partes del mundo y sus ventajas hidrológicas dependen de diversos factores. Tal es el caso de los techos verdes, aunque hay fuentes de consulta que señalan algunas restricciones en su implementación tales como las condiciones técnicas de la losa donde se deseen instalar (IMPLAN, 2019). Los techos verdes extensivos, como los considerados en este estudio, son capaces de reducir la escorrentía siempre y cuando su coeficiente de esguerrimiento se encuentre entre 0.58-0.75 (Versini et al., 2015). En el presente estudio se utilizó un coeficiente de 0.7. También, algunos autores mencionan que gracias al sustrato y su vegetación son capaces de retener la escorrentía desde un 27% hasta 81% (Liu et al., 2020).

En cuanto a la capacidad hidráulica del pavimento permeable para gestionar la escorrentía, hay investigaciones experimentales que simularon lluvias con duración de 15 minutos e intensidades de 127.53 mm/h (de Sales-Braga et al., 2022). Los autores determinaron que el pavimento permeable fue capaz de gestionar el 20% de la escorrentía bajo estas condiciones.

Por último, cabe destacar que, aunque los SUDS son obras complementarias que se adaptan a las condiciones preexistentes, sus capacidades de gestión del agua pueden verse disminuidas precisamente porque no pueden diseñarse para las condiciones deseables, sino para las que ya existen. Sin embargo, cuando se combinan las funciones que varios tipos de SUDS pueden proveer, como fue el caso de los techos verdes y pavimentos permeables, sus ventajas aumentan, como lo determinamos en nuestro análisis.

Otros autores han demostrado la gran capacidad que la combinación de propuestas puede proporcionar. Ferrans et al. (2023) encontraron que, por medio de la optimización de criterios como su distribución espacial, intensidades de lluvia a distintos tiempos de retorno, entre otros, los techos verdes, jardines de lluvia y pavimentos permeables son capaces de mitigar en su totalidad las inundaciones. En otra investigación se demostró que, además de la combinación de SUDS, su interconectividad por medio de factores como su distribución espacial a lo largo de la trayectoria de los escurrimientos, el gasto máximo de la escorrentía, el área de drenaje que gestionan, entre otros, pueden ser determinantes para mitigar inundaciones (Ma et al., 2022).

## Conclusiones

En este estudio se evaluaron los criterios necesarios para seleccionar espacialmente las zonas idóneas para la implementación de SUDS como estrategia de mitigación de inundaciones y como fuentes de aprovechamiento de la escorrentía urbana. Se determinó la capacidad de los techos verdes, pavimentos permeables, así como la combinación de estas estrategias para gestionar la escorrentía por medio de su infiltración y retención. Cualquiera de las tres alternativas demostró ser capaz de mitigar un caudal y volumen de escorrentía urbana superiores a la infraestructura hidráulica que existe actualmente.

De los tres escenarios analizados, es recomendable considerar la combinación de SUDS, pues estos incrementan su eficiencia respecto a cada alternativa por separado. En cuanto a las consideraciones técnicas para su diseño, la superficie de la cuenca que necesita ser intervenida para una gestión sostenible de la escorrentía urbana es independiente del tiempo de retorno que se desee seleccionar.

La recomendación de este estudio es elegir el tiempo de retorno de 5 años, debido a que la frecuencia de las precipitaciones que estos SUDS pueden gestionar será mayor. No obstante, a 10 años, aunque la frecuencia de las precipitaciones sea menor, la capacidad de las propuestas para gestionar la escorrentía aumenta, por lo que esta alternativa también es viable.

Por último, se destaca de este estudio que las condiciones empleadas para evaluar la capacidad hidrológica de las propuestas tienen algunas limitaciones a tener en cuenta. Por ejemplo, que se consideraron superficies de azotea homogéneas, independientemente si en las manzanas existen viviendas o comercios. En cuanto a las vialidades, aunque se consideraron solo las secundarias, es posible que no todas puedan adaptarse con pavimento permeable si estas permiten el tránsito de vehículos pesados. Además, también debe mencionarse que esta eficiencia podría aumentar si se incluyen otras opciones SUDS en camellones y áreas verdes.

## Referencias

- Aguas Residuales.INFO (2016). 5 países líderes en el manejo inteligente del agua. 16 de mayo de 2016. Consultado el 23 de febrero de 2024 desde: <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/5-paises-lideres-en-el-manejo-inteligente-del-agua-6tXbM>
- Álvarez-Manilla-Aceves, A., Valadéz-Castro, J. P., Garnica-Anguas, P., Martínez-Peña G. E. I. (2002). La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. Aplicación en la infraestructura del transporte. Publicación técnica No. 195. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 89 pp. Sanfandila, Querétaro.
- Amorcho-Daza, H. D. (2016). Estructuras SUDS para países tropicales con intensidades de lluvia altas- ¿Cuáles son las más apropiadas? Universidad de los Andes, tesis de licenciatura. Diciembre de 2016, Bogotá, Colombia.
- Arroyo, V. (2016). Drenaje urbano, la tarea pendiente de América Latina. iAgua. Publicado el 5 de agosto de 2016. Consultado el 23 de abril de 2024 desde: <https://www.iagua.es/blogs/victor-arroyo/drenaje-urbano-tarea-pendiente-america-latina>
- Cárdenas-Gutiérrez, E., Albitzer Rodríguez, Á., Jaimes-Jaramillo, J. (2017). Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua. Espacio del Divulgador, 24.2, Universidad Autónoma del Estado de México. Consultado el 20 de abril de 2024 desde: <http://ri.uaemex.mx/repositorio/bitstream/handle/20.500.11799/95844/10450491009.pdf?sequence=1>
- Castro-Fresno, D., Rodríguez-Bayón, J., Rodríguez-Hernández, J., Ballester-Muñoz, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Interciencia*, 30(5), 255-260.
- City of Melbourne (2017). Green our city strategic action plan 2017-2021: Vertical and rooftop greening in Melbourne. Consultado el 5 de abril de 2024 desde: <https://www.melbourne.vic.gov.au/community/greening-the-city/green-infrastructure/Pages/green-our-city-action-plan.aspx>
- CLIMA (2020). Clima Tlalnepantla de Baz-México. Consultado el 28 de agosto de 2023 desde: [https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/mexico/tlalnepantla-766169/#google\\_vignette](https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/mexico/tlalnepantla-766169/#google_vignette)
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. ISBN: 978-607-626-036-4, 92 pp. Ciudad de México. Recuperado el 24 de abril de 2024, desde: <https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-29.pdf>
- Courty, L. G. (2021). Hacia una gestión de las aguas urbanas basada en la naturaleza. *Perspectivas IMTA*, 6: 1-3.
- de Sales-Braga, N. T., Arruda-Junior, E. S., Pinheiro-Cordeiro, L. N. (2022). Performance and runoff coefficient of permeable concretes subjected to heavy rainfall simulations. *Revista Matéria*, 27(4): 1-19.
- Egea-Pérez, R. (2018). Investigación sobre modelos de gestión de infraestructuras hidráulicas urbanas resilientes en relación con los riesgos hidrológicos y geológicos. Universidad de Alicante, tesis doctoral. 2018, Alicante, España.
- Escobar-Ruiz, G. (2021). Sustainable urban drainage systems: Universidad Alcalá de Henares, Máster Universitario en Hidrología. 2021, Alcalá de Henares, España.
- Ferrans, P., Reyes-Silva, J. D., Krebs, P., Temprano, J. (2023). Flood Management with SUDS: A Simulation–Optimization Framework. *Water*, 15(3), 426.
- Gaceta Municipal del Ayuntamiento de Tlalnepantla de Baz (2019). Atlas municipal de Riesgos 2019-2021. Número 18, volumen I. Publicado el 26 de abril de 2019. Consultada el 6 de febrero de 2024 desde: [www.tlalnepantla.gob.mx](http://www.tlalnepantla.gob.mx)
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2018). Aviso por el que se da a conocer el proyecto de norma ambiental para el Distrito Federal PROY-NADF-013-RNAT-2017, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México. Consultado el 24 de abril de 2024 desde: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/PROY-NADF-013-RNAT-2017b.pdf>
- IMPLAN, Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo (2019). Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para municipios mexicanos. Publicado en junio de 2019. Consultado el 01 de septiembre del 2023 desde:

- [http://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2019/06/Manual\\_IV3.pdf](http://www.implanhermosillo.gob.mx/wp-content/uploads/2019/06/Manual_IV3.pdf)
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Censo de información geográfica municipal 2010 Tlalnepantla de Baz. Consultado el 2 de enero de 2024 desde: <https://www.inegi.org.mx>.
- Jiménez, A., Joya, J. (2015). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) como gestión integral en la regulación y control de aguas lluvias; caso de estudio sector en la ciudad de Bogotá. Universidad Católica de Colombia, Licenciatura en Ingeniería Civil, 73 pp. Bogotá, Colombia.
- Jiménez, R., (2023). Inundaciones y caos vial deja fuerte lluvia en Tlalnepantla; hay vehículos atrapados. *El Universal*, (6 de julio de 2023). Consultado el 05 de septiembre de 2023 desde: <https://www.eluniversal.com.mx/edomex/inundaciones-y-caos-vial-deja-fuerte-lluvia-en-tlalnepantla-hay-vehiculos-atrapados/>
- Jiménez, R. (2024). Detectan 13 puntos de riesgo por inundación en Tlalnepantla. *El Universal* (23 de abril de 2024). Consultado el 23 de abril de 2024 desde: <https://www.eluniversal.com.mx/edomex/detectan-13-puntos-de-riesgo-por-inundacion-en-tlalnepantla/>
- Liu, W., Feng, Q., Chen, W., Wei, W. (2020). Assessing the runoff retention of extensive green roofs using runoff coefficients and curve numbers and the impacts of substrate moisture. *Hydrology Research*, 51(4): 635–647.
- Ma, Y., Xia, X., Liang, Q., Wan, H. (2022). Investigating the Impact of Spatial Distribution of Sustainable Drainage System (SuDS) Components on Their Flood Mitigation Performance in Communities with High Groundwater Levels. *Water*, 14(9): 1367.
- ONU, Organización de las Naciones Unidas (2018). Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, “Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo”. Publicado el 16 de mayo de 2018. Consultado el 5 de abril de 2024 desde: <https://news.un.org/es/story/2018/05/1433842>
- Perales-Momparler, S., Doménech, I. (2008). Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia. *Revista Técnica de Medio Ambiente*, 21(124): 92-104.
- Ramírez-Ambríz, M. G. (2017). Análisis estadístico para estimar coeficientes de escurrimiento asociados a distintos periodos de retorno. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesina para obtener especialidad. Junio de 2017. Ciudad de México, México. Consultado el 18 de abril de 2024 desde: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14366/Tesina%2C%20Mauricio%20Guillermo%20Ramirez%20Ambroz.pdf>
- Robles-Rivera, J., (2015). Efecto real de las diferentes técnicas y estructuras SUDS sobre los hidrogramas de salida de sistemas de drenaje urbano. Universidad de los Andes, tesis de licenciatura. 2015, Bogotá, D.C. Consultado el 13 de abril de 2024 desde: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/67d3bf6d-1b1e-4cb4-af25-9b516b0f6180/content>
- Rodríguez-Bayón, J., Rodríguez-Hernández, E., Gómez-Ullate, F., Castro-Fresno, D. (2009). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS, Universidad de Cantabria, tesis de licenciatura. Mayo de 2009. Cantabria, España.
- Salto, D. (2020). Evaluación del potencial de retención de agua lluvia de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) sobre áreas aledañas a la vía a la parroquia Santa Rosa, vía ecológica y av. Mauelita Sáenz-ambato y su aporte a la mitigación de inundaciones. Tesis de maestría en Gestión Ambiental, Universidad Tecnológica Indoamérica, 90 pp. Quito, Ecuador. Consultado el 5 de marzo de 2024 desde: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.uti.edu.ec/bitstream/123456789/1893/1/SALTOS%20SALAZAR%20DIEGO.pdf>
- Secretaría Administrativa UNAM (2010). Disposiciones para la instalación de sistemas de naturación en edificaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México. En Dirección General de Obras y Conservación, 40 pp. Ciudad de México. Consultado el 5 de marzo de 2024 desde: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abogadogeneral.unam.mx/pdf/2020/04\\_DisposicionesInstalacionSistemasNaturacionEdificaciones.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abogadogeneral.unam.mx/pdf/2020/04_DisposicionesInstalacionSistemasNaturacionEdificaciones.pdf)
- Secretaría de Economía (2013). Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013. Edificación sustentable – Criterios y requerimientos ambientales mínimos. 158 pp. Consultado el 22 de abril de 2024 desde: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3156.pdf>
- Soy mexicano (s.f.). Tlalnepantla de Baz, Estado de México. Consultado el 20 de agosto de 2023 desde: <https://www.soymexiquense.com/edomex/region-xii/tlalnepantla/58-municipio-tlalnepantla-de-baz>
- SUDS S.I. (2003). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible S.I. Parque Gómez Narro, Madrid. Mayo de 2003. Consultado el 05 de abril de 2024 desde: <https://drenajesostenible.com/wp-content/uploads/Parque-Gomeznarro.pdf>
- Versini, P. A., Ramier, D., Berthier, E., De Gouvello, B. (2015). Assessment of the hydrological impacts of green roof: from building scale to basin scale. *Journal of Hydrology*, 524: 562–575.
- Zeyu, X. (2022). Sistemas de drenaje urbano sostenible. Universidad de Alcalá de Henares, Máster universitario en Hidrología. 22 de mayo de 2022, Alcalá de Henares, España.