

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería Mexicali



“Desafíos en la implementación de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SuDS) en ciudades de países en desarrollo”

Tesis para obtener el grado de:
Maestría en Ciencias

Presenta:

Ing. Daniela Sagastume Puerta

Director de tesis: Dr. Carlos Salazar Briones

Co dirección: Dr. José Mizael Ruiz Gibert

Mexicali, B.C.

14 de junio del 2022

Dedicatoria:

“Esta tesis está dedicada a mi esposo, mi familia y amigos, ustedes hacen que esta vida sea más bella.”

Agradecimientos:

A mi Director el Dr. Carlos Salazar Briones y Co-Director Mizael Ruiz Gibert, por haberme guiado en este proyecto, fomentado mi desarrollo académico y profesional, y sobre todo por avivar mi curiosidad por el aprendizaje y conocimiento.

A mis amigos de toda la vida que me acompañan desde siempre por su amistad sincera, apoyo y lealtad, gracias por creer en mí.

A mi hermano Fernando, por cuidarme y protegerme, por tus consejos y por brindarme todo tu cariño.

A mis padres Cleotilde y Luis quienes con su amor incondicional y apoyo me han impulsado a alcanzar todas mis metas, gracias por inculcar en mí los valores de esfuerzo y perseverancia, y por siempre recordarme que Dios está conmigo.

A mi esposo Victor, por brindarme tanto amor, apoyo y paciencia, por siempre creer en mi potencial, por estar a mi lado en los momentos más difíciles y sobre todo porque tú me motivas a ser una mejor versión de mí misma. Un logro más juntos, te amo.

Contenido

Capítulo 1 Introducción	6
Planteamiento del problema	6
Justificación	7
Objetivo General	8
Objetivos Particulares	8
Hipótesis.....	8
Enfoque general de la tesis	9
Aportaciones de esta investigación	9
Capítulo 2 Marco Teórico	10
Antecedentes de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SuDS).....	10
Desafíos actuales de la integración de SuDS	15
Área de estudio.....	17
Medio Físico	17
Localización del área de estudio	17
Clima	17
Geología.....	17
Cuenca hidrológica de Mexicali	18
Capítulo 3. Materiales y Métodos.....	20
Análisis multicriterio	22
Métodos y modelos de simulación.....	29
Simulación de Lluvia / Escorrentía	31
Selección de los datos	32
Datos de entrada para los SuDS	41
Celdas de biorretención	45
Jardines de lluvia	45
Techos verdes	46
Zanjas de infiltración	47
Pavimentos permeables	48
Barriles de lluvia	48
Cunetas verdes	49
Resultados y Discusión	51
Conclusiones y recomendación.....	64

Conclusiones teóricas	64
Conclusiones metodológicas	66
Conclusiones físicas	66
Anexos	68
Referencias bibliográficas.....	73

Índice de figuras

Figura 1 Zona de estudio "Colonia El Vidrio".....	19
Figura 2. Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 10 años.....	33
Figura 3 Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 25 años.....	34
Figura 4 Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 50 años.....	35
Figura 5 Propuesta de sistema pluvial para "El Vidrio"	38
Figura 6 Subcuencas de aportación en la zona de estudio "El Vidrio"	40
Figura 7 Escorrentía máxima en LPS de la simulación con un TR10.....	57
Figura 8 Flujo máximo en LPS en la salida 1 con un TR10	57
Figura 9 Flujo máximo en LPS en la salida 2 con un TR10	58
Figura 10 Escorrentía máxima en LPS de la simulación con un TR25.....	59
Figura 11 Flujo máximo en LPS en la salida 1 con un TR25	59
Figura 12 Flujo máximo en LPS en la salida 2 con un TR25	60
Figura 13 Escorrentía máxima en LPS de la simulación con un TR50.....	61
Figura 14 Flujo máximo en LPS en la salida 1 con un TR50	61
Figura 15 Flujo máximo en LPS en la salida 2 con un TR50	62
Figura 16 Grafico de reducción de escorrentía máx. por cada SuDS.....	63

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación de los SuDS	13
Tabla 2. Opciones de simulación en SWMM	31
Tabla 3 Hietograma Tr 10 años	33
Tabla 4 Hietograma Tr 25 años	34
Tabla 5 Hietograma Tr 50 años	35
Tabla 6 Propiedades de las tuberías	36
Tabla 7 Propiedades de los pozos.....	37
Tabla 8 Propiedades de las subcuencas	39
Tabla 9 Parámetros de entrada en SWMM para Celdas de biorretención	45
Tabla 10 Parámetros de entrada en SWMM para Jardines de lluvia.....	46
Tabla 11 Parámetros de entrada en SWMM para Techos verdes	47
Tabla 12 Parámetros de entrada en SWMM para Zanjias de infiltración	47
Tabla 13 Parámetros de entrada en SWMM para Pavimentos permeables.....	48
Tabla 14 Parámetros de entrada en SWMM para Barriles de lluvia	49
Tabla 15 Parámetros de entrada en SWMM para Cunetas verdes	49
Tabla 16 Porcentaje de áreas cubiertas de la subcuenca seleccionada	50
Tabla 17 Ejemplos de estudios que han abordado los desafíos de integración de los SuDS	51
Tabla 18 Aplicabilidad de las herramientas de simulación.....	52
Tabla 19 Capacidades de los programas de simulación y modelado.....	53
Tabla 20 Valores finales obtenidos de la simulación con un TR10.....	56
Tabla 21 Valores finales obtenidos de la simulación con un TR25.....	58
Tabla 22 Valores finales obtenidos de la simulación con un TR50.....	60
Tabla 23 Porcentaje de reducción de escorrentía máx. por cada SuDS	62

Capítulo 1 Introducción

Planteamiento del problema

El problema de gestión de aguas pluviales en zonas urbanas es un tema que ha ido tomando relevancia a nivel mundial (Chen W., et al., 2017; Wang, M., et al., 2017; Noordwijk, M. V., et al., 2017, citado en Alhumaid, M., et al. 2018). En los últimos años la expansión urbana se ha visto en constante incremento, causando modificaciones en el transporte y descarga del agua, dando como resultado la alteración de los patrones hidrológicos (Perales Momparler, C. S., 2015). Por consiguiente, el riesgo a inundaciones en estas zonas ha aumentado considerablemente, a consecuencia de una mayor área de impermeabilidad y al cambio climático (Jato-Espino, D., et al, 2016). Actualmente, el 80% de la población mundial es vulnerable ante inundaciones (Winsemius, H. C., et al., 2018 citado en Oladunjoye, O. A., et al., 2019).

Las inundaciones comprenden aproximadamente un tercio de los desastres naturales que ocurren a nivel mundial, esto considerando las pérdidas económicas como el factor principal, además son las causantes de aproximadamente el 50% de pérdidas humanas por catástrofes (Lopardo, R. A., & Seoane, R. S., 2000). Estas inundaciones traen consigo problemas sociales y pérdidas económicas (Kundzewicz, Z. W., et al., 2014; citado en Li, L., et al., 2020), afectando ferrocarriles, carreteras, redes de suministro de energía y agua (Bell, V. A., et al., 2012; Zevenbergen, C., & Gersonius, B., 2007, citado en Ossa-Moreno, J., et al., 2017). Anualmente los daños causados por inundaciones dejan pérdidas de más de \$104 mil millones en todo el mundo (Kundzewicz, Z. W., et al., 2014; citado en Li, L. et al., 2020).

Según las Naciones Unidas, entre el periodo de 1995 a 2015, las inundaciones urbanas causaron alrededor de 157,000 muertes y afectaron a más de 2,300 millones de habitantes (Richard, D., 2016; citado en Li, L., et al., 2020). Durante el periodo del 2008 al 2010 se realizaron encuestas en 351 ciudades de China, que arrojaron que el 62% habían sido afectadas por inundaciones (Feng, L., et al., 2014,

citado en Li, L., et al., 2020). En Europa se han tenido pérdidas de más de 70,000 millones de euros en las últimas décadas a consecuencia de inundaciones (Paprotny, D., et al., 2018). En México se estima que cada año se generan pérdidas por 230 millones de dólares cada año debido a inundaciones (Forbes Staff, 2017). En 2013 Alemania tuvo pérdidas económicas de aproximadamente 16.5 mil millones de dólares y Canadá de 4.7 mil millones de dólares debido a inundaciones (Swiss, R., 2014). Según la Annual Global Climate and Catastrophe Report, en el 2014, en la India y Pakistán las inundaciones provocaron pérdidas económicas por un valor arriba de los 18 mil millones de dólares. Ese mismo año, el sureste de Europa, Reino Unido, China y Estados Unidos presentaron inundaciones que causaron daños importantes (Bernal, A. I. C., et al., 2016).

Justificación

El sistema de drenaje de una zona urbana es diseñado para solucionar los problemas generados por inundaciones (Zhou, Q., 2014). Su función se limita a trasladar los escurrimientos superficiales fuera de las zonas urbanas de manera rápida, sin considerar otros factores como la calidad del agua y el aprovechamiento del recurso hídrico (Kozak, D., et al., 2020). Tradicionalmente para afrontar la problemática de inundaciones urbanas se sobredimensionan las tuberías y obras de drenaje (Jato-Espino, D., et al, 2016), sin embargo, estas técnicas de ingeniería tradicionales se han vuelto obsoletas frente al crecimiento urbano y el cambio climático (Lennon, M., et al., 2014, citado en Chapman, C., & Hall, J. W., 2021). Cuando la capacidad del drenaje convencional se ve rebasada durante un evento extremo, se generan inundaciones que afectan el flujo vehicular y causan pérdidas económicas e incomodidades para la población (Qin, H. P., et al., 2013). Diseñar correctamente un sistema de drenaje pluvial sirve para brindar una mayor seguridad a los vehículos y a los peatones, al igual que salvaguardar la infraestructura urbana. Para que esto sea posible es necesario llevar a cabo un análisis desde el inicio de la planeación urbana, de esta forma el diseño puede maximizar sus alcances (Abdelrahman, Y. T., et al, 2018).

Objetivo General

El objetivo de este estudio es desarrollar una guía metodológica para los planeadores urbanos de países en desarrollo con la finalidad de hacer frente a los retos de la integración de los SuDS, buscando transitar hacia una planificación urbana sustentable.

Objetivos Particulares

- Elaborar una revisión literaria de los diferentes tipos de SuDS que puedan ser utilizados e incorporados al sistema actual de la zona de estudio.
- Identificar las principales barreras de la integración de los SuDS en la planificación urbana desde un enfoque multicriterio.
- Analizar diferentes herramientas de simulación y modelación, para seleccionar el que mejor se adapte a las necesidades e información disponible en la zona de estudio.
- Comparar la eficiencia del uso de un drenaje pluvial tradicional contra un sistema pluvial con SuDS integrados, llevando a cabo una simulación hidráulica de un caso de estudio con diferentes periodos de retorno.

Hipótesis

La implementación de los SuDS en países en desarrollo se vislumbra como la alternativa más adecuada para la gestión de inundaciones urbanas. Si bien los SuDS, enfrentan diversos desafíos como financiamiento, vías regulatorias, factores socioeconómicos, estándares de diseño e innovación, es posible lograr una transición hacia una planeación urbana sustentable y una mejor gestión del agua pluvial mediante un enfoque multicriterio y un cambio que involucra a todas las partes interesadas.

Examinando las diferentes herramientas de solución de estudios que presentan casos de éxito se podría impulsar a los países en desarrollo a buscar alternativas para superar estos desafíos.

Enfoque general de la tesis

La falta de una guía metodológica disponible para los tomadores de decisiones dificulta la tarea de gestionar los problemas de inundaciones urbanas en especial en las ciudades ubicadas en países en desarrollo. Por lo que es necesario buscar alternativas de solución mas sustentables a largo plazo.

La integración de los SuDS en los sistemas pluviales tradicionales presenta una mejor alternativa para gestionar problemas de inundación, además de brindar diversos beneficios ecosistémicos que mejoran la calidad de vida de la población y fomentan la restauración ambiental.

En este sentido el presente trabajo incluye como herramienta una guía metodológica que abarca desde una revisión de literatura acerca de las barreras que se presentan en todo el mundo en cuanto a la integración de los SuDS, considerando como los 5 desafíos principales el financiamiento, vías regulatorias, estándares de diseño, factores socioeconómicos e innovación. Se plantean las soluciones para afrontar con éxito estos desafíos mediante el uso de diferentes metodologías y herramientas.

Establecer los diferentes métodos y herramientas de modelación de sistemas pluviales, con apoyo de softwares de modelación que consideren diferentes variables, adaptando la simulación a la información disponible y a características particulares del caso de estudio.

Y, por último, evaluar las técnicas de SuDS con mayor aplicabilidad en la colonia "El Vidrio" ubicada en la ciudad de Mexicali, BC, considerando las limitantes que la zona presenta, esto con apoyo de una simulación de lluvia/ escorrentía con la herramienta SWMM. La metodología utilizada en este estudio podrá ser replicada en otras regiones del país y del mundo que presentan condiciones similares.

Aportaciones de esta investigación

La aportación de este estudio es una guía metodológica para los tomadores de decisiones de países en desarrollo proponiendo el diseño de un sistema pluvial

urbano que integre SuDS para maximizar su potencial, buscando mitigar los problemas de inundación que la zona presenta, de esta forma se pretende obtener un modelo conceptual que nos permita identificar las barrera de financiamiento, vías regulatorias, estándares de diseño, factores socioeconómicos e innovación, desafíos hidrológicos e hidráulicos que las ciudades en países en desarrollo presentan en la modelación de inundaciones, buscando impulsar a futuros estudios para buscar la forma de abordar dicha escases de datos.

Capítulo 2 Marco Teórico

Antecedentes de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SuDS)

En los últimos años, las estrategias de gestión de aguas pluviales han consistido en reducir la impermeabilidad de las superficies urbanas, aumentando la infiltración y la retención, así mismo aprovechando el recurso hídrico (Lund, N. S. V., et al., 2019; Qin, H. P., et al., 2013). A este tipo de estrategias de control se les conoce con diferentes términos dependiendo del lugar, las más comunes son Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SuDS), Diseño urbano sensible al agua (WSUD), Desarrollo de bajo impacto (LID), Mejores prácticas de gestión (BMP), Infraestructura verde (GI) o Medidas de control de aguas pluviales (SCM) (Fletcher, T. D., et al., 2015) (citado en Joshi, P., et al., 2021). En esta investigación utilizaremos el termino de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SuDS).

El termino de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenibles (SuDS) surge a finales de la década de 1990 por Scottish Water, hoy en la actualidad este término predomina en el Reino Unido, Europa continental y muchas partes del mundo, incluida América Latina (Kozak, D., et al., 2020). La difusión de los SuDS mediante informes y normativas ha provocado su adopción en diferentes países (Field, C. B., et al., 2012). Algunos países desarrollados como Estados Unidos, Australia, Reino Unido y en toda Europa los SuDS han sido incluidos en las regulaciones de gobernanza (Benton-Short, L. et al., 2019; Roy, A. H., et al., 2008; Melville-Shreeve, P., et al., 2018; Eggermont, H., et al., 2015; citado en Barros Ramalho Alves, P. et al., 2020).

Los países en desarrollo (Zhang, L., et al., 2016), también han mostrado interés en la adopción de SuDS como un nuevo enfoque para la gestión de inundaciones, sin embargo, es necesario considerar otros aspectos relevantes como la variabilidad regional en el clima, la demografía y las etapas de desarrollo (Higgitt, D., 2015, citado en Tang, Y. T., et al., 2018).

Países como China y el Reino Unido hacen énfasis en la importancia de transitar hacia una urbanización sostenibles con el objetivo de adaptarse y mitigar los problemas generados por inundaciones (Li, L., et al., 2020). Por muchos años el Reino Unido y específicamente Escocia, fueron de los primeros países en buscar transitar hacia una mejor gestión del drenaje en las ciudades, en la actualidad Dinamarca y Suecia son los países más destacados en este proceso de transición (Andrés-Doménech, I. et al., 2021).

En el 2015 China comenzó con el Proyecto de Construcción de la Ciudad Esponja (SCCP). Este proyecto propone modificar el 20% de la superficie urbana de China en Ciudades Esponja para el año 2020, y aumentándolo al 80% para el año 2030. El enfoque de estas ciudades se centra en la mitigación de inundaciones urbanas (Xiang, C., et al., 2019).

En Noruega, la metodología para el uso de los SuDS está dividida dependiente de la magnitud del evento, para eventos pequeños se debe infiltrar localmente, para eventos medianos se debe detener localmente y para eventos grandes se deben garantizar vías de inundación seguras (Lindholm, O., et al., 2008, citado en Muthanna, T. M. et al., 2018).

Algunos países han sobresalido en investigaciones relacionadas con los SuDS, como España e Italia, quienes muestran resultados prometedores de este nuevo enfoque del manejo de las aguas pluviales en el mediterráneo (Perales-Momparler, S., et al., 2017). A partir del 2002 España empezó con la aceptación de los SuDS, y durante las dos décadas posteriores ha demostrado que estos parecen ser una buena alternativa incluso en climas mediterráneos. En la actualidad los profesionales y políticos en España tienen más conocimientos del drenaje

sostenible gracias a las investigaciones que han arrojado resultados positivos en cuanto a cantidad y calidad del agua (Andrés-Doménech, I. et al., 2021).

Los profesionales de esta área se han dedicado a estudiar las escalas para una elección adecuada de ubicación de los SuDS, con el fin de una mejora en la gestión del agua, calidad y generación de servicios. Normalmente las escalas se dividen en regional, urbana, local y microescala (Jiménez Ariza, S. L. et al., 2019). Pese al incremento de investigaciones y avances, la implementación de estrategias sostenibles para mitigar las inundaciones aun presenta retos (Barros Ramalho Alves, P. et al., 2020).

En la actualidad, mayoría de las investigaciones efectuadas son en regiones templadas, lo que supone ser un inconveniente para aplicar estas investigaciones en regiones con diferentes condiciones climáticas (de Macedo, M. B., et al., 2019). Para los países con diferencias regionales, climáticas y socioeconómicas esto presenta un desafío (Goncalves, M. L., et al., 2018). Los tomadores de decisiones de países donde tienen temporadas secas y lluviosas requieren de información y parámetros que se ajusten a sus necesidades para poder mitigar las inundaciones (Barros Ramalho Alves, P. et al., 2020).

Características de los SuDS

Los SuDS se dividen en medidas estructurales, que se refiere a la infraestructura física, y en medidas no estructurales, lo que abarca políticas, normativas, educación, etc., con el fin de lograr una mejor gestión de las aguas pluviales que conllevan a múltiples beneficios (Fletcher, T. D., et al., 2015; Riechel, M., et al., 2016, citado en Joshi, P., et al., 2021).

Utilizando la información de la recopilación literaria (Martínez, C. O., 2015; Trapote, A., & Fernández, H., 2016), se tomaron elementos de interés para elaborar una tabla que concentre información acerca de la clasificación de los "SuDS", dividiéndolos en estructurales y no estructurales, mencionando los tipos que existen y el propósito que cumple cada uno de ellos, facilitando el análisis y la elección de las técnicas de SuDS más adecuadas para cada zona de estudio.

Tabla 1 Clasificación de los SuDS

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLES		
Clasificación	Tipo	Objetivo
Estructurales	Humedales	Proporcionan un mayor grado de filtración y eliminación de nutrientes gracias a la acción de la vegetación.
	Estanques	Proporcionan almacenamiento temporal del agua de lluvia adicional por encima del nivel de agua permanente y pueden proporcionar beneficios a la vida silvestre y de esparcimiento.
	Depósitos de detención	Diseñados para frenar durante un tiempo determinado los escurrimientos de una tormenta y permitir su liberación gradualmente poco después de la precipitación.
	Franjas filtrantes	Diseñadas para conducir los escurrimientos superficiales y promover la remoción de partículas contaminantes, así como la infiltración.
	Drenes filtrantes	Captan y conducen las aguas pluviales.
	Depósitos de infiltración	Están diseñados para interceptar y almacenar un determinado volumen de escurrimiento hasta que se produce su infiltración en el suelo.
	Cunetas verdes	Son estructuras de conducción para dirigir el escurrimiento a la siguiente etapa del tren de manejo y para promover la infiltración en donde las condiciones del suelo y del agua subterránea lo permitan.
	Jardines de lluvia	Permiten un tratamiento de la escorrentía a través de la vegetación y suelos preparados o autóctonos.
	Cubiertas vegetadas	Están diseñadas para interceptar y retener la precipitación, reducir el volumen de escurrimiento y la atenuación de los flujos máximos.
	Superficies permeables	Proporcionan una superficie adecuada para peatones y/o vehículos, permitiendo al mismo tiempo que el agua de lluvia se infiltre a través de la superficie y en las capas subyacentes.

	Pozos y zanjas filtrantes	Tienen la finalidad de almacenar el agua procedente de los escurrimientos hasta que se produce la infiltración en el terreno natural.
No estructurales	Inversión	Elaboración de manuales de diseño y construcción, y programas de seguimiento de los sistemas de drenaje urbano.
	Programas de formación y educación	La educación puede ser un medio eficaz para reducir la cantidad de contaminantes de fuentes no puntuales que llegan a los cuerpos receptores.
	Políticas y leyes	Desarrollar políticas públicas que integren aspectos ambientales y de gestión hídrica en la legislación urbanística

Los beneficios dependen del tipo de SuDS que se implemente, ya que unos se concentran en el almacenamiento de la escorrentía superficial y otros en mejorar infiltración mediante el aumento de la permeabilidad (Liao, K. H., et al., 2017, citado en Chapman, C., & Hall, J. W., 2021). El correcto desempeño de los SuDS depende del diseño y supervisión de los profesionales en esta área debido a sus características artificiales (Miró, A., et al., 2018).

Para adaptar los SuDS al drenaje existente en las ciudades, por lo general requiere de modelos de simulación computacionales que suelen implicar altos costos y de información con la que no siempre se cuenta. Es fundamental realizar diversos estudios antes de implementar SuDS en una ciudad, por lo que un análisis multicriterio es de gran ayuda para definir estrategias (Jiménez Ariza, S. L., et al., 2019).

Los SuDS representan una mejor alternativa en la gestión de inundaciones que ofrece la oportunidad de restablecer la biodiversidad y el bienestar y salud de la sociedad (Charlesworth, S. M., & Booth, C. A., 2016, citado en Miró, A., et al., 2018). Algunos de los SuDS más comunes en el mundo son los techos verdes, pavimentos permeables, franjas de filtro, cunetas verdes, zanjas de infiltración, sumideros, jardines de lluvia, estanque de detención y retención, y humedales artificiales (Sun, C., et al., 2020).

Las cunetas verdes son un tipo de SuDS cuya función es reducir los volúmenes de escorrentía superficial y mejorar la calidad del agua, estos son usados principalmente en la infraestructura vial en zonas urbanas, y en las zonas rurales funcionan muy bien para mitigar las inundaciones (Rezaei, A. R., et al., 2019; Woznicki, S. A., et al., 2018; Shafique, M., et al., 2018; Young, B. N., et al., 2018; Avery, L. M., 2012, citado en Sañudo-Fontaneda, L. A., et al., 2020).

Los techos verdes están conformados por vegetación viva que se posiciona en el techo de viviendas y edificios con el propósito de reducir la escorrentía pluvial y eliminar contaminantes del agua, además de brindar valores estéticos y ecológicos (Rowe, D. B., 2011, Woods-Ballard, B., et al., 2015). Sin embargo, en la actualidad no existen suficientes estudios de la aplicabilidad de este tipo de SuDS en zonas áridas y semiáridas (Perales-Momparler, S., et al., 2017, citado en Andrés-Doménech, I. et al., 2018).

El pavimento permeable (PP) ha sido uno de los SuDS más utilizados en todo el mundo en los últimos años debido a la facilidad de integrarlo en las zonas altamente urbanizadas como una forma de mitigar las inundaciones mediante la infiltración de la escorrentía superficial (Liu, C. Y., & Chui, T. F. M., 2017). Estos sirven como un tren de tratamiento ya que funcionan como un sistema de infiltración, recolección, transporte y almacenamiento de las aguas pluviales, ofreciendo mayor seguridad y comodidad para la sociedad (Rodríguez Hernández, J., 2008, citado en Jato-Espino, D., et al., 2016).

Desafíos actuales de la integración de SuDS

La urbanización ha causado pérdidas de ecosistemas y tierras valiosas causando graves problemas ambientales, sociales y económicos, por lo que necesario optar por prácticas de urbanización sostenibles (Jiménez Ariza, S. L., et al, 2019).

Es necesario mejorar la resiliencia de las ciudades, protegiendo la infraestructura, la vida humana y las propiedades mediante una mejor planificación urbana (Pitt, M, 2008).

Uno de los problemas que enfrenta el nuevo enfoque de drenaje urbano sostenible además de barreras sociales, de gobernanza, normativas y técnicas, son los contextos políticos y económicos (Andrés-Doménech, I. et al., 2021). Es fundamental realizar diversos estudios antes de implementar SuDS en una ciudad, por lo que un análisis multicriterio es de gran ayuda para definir estrategias (Jiménez Ariza, S. L., et al., 2019).

Mejorar la resiliencia urbana es una tarea que requiere de un enfoque integrado y multidisciplinario, donde los propietarios de infraestructuras, planificadores urbanos, comunidades, reguladores y operadores deben trabajar en conjunto para crear soluciones en base a sus conocimientos y experiencias (McClymont, K., et al., 2020).

En algunos países en desarrollo la aplicación de los SuDS es limitada y suelen considerar solo factores hidráulicos e hidrológicos (Jiménez Ariza, S. L., et al, 2019). Debido a que los SuDS proporcionan diversos beneficios, se requiere una evaluación de estos mismos que consideren otros aspectos como ambientales sociales y económicos y no solo criterios hidráulicos e hidrológicos.

Área de estudio

Medio Físico

Localización del área de estudio

La ciudad de Mexicali, capital del estado de Baja California ubicado al noroeste de México, limita al norte con California EE. UU., sus coordenadas son 32.55° N y 115.47° O.

A pesar de ser una zona en la que las lluvias no son frecuentes, no se necesita de un gran evento de precipitación para provocar inundaciones debido a que esta zona presenta un tipo de suelo arcilloso lo que impide la infiltración del agua, provocando estancamientos por días o incluso semanas, ya sea debido a que el drenaje pluvial no esté funcionando al 100% de su capacidad, que las obras de drenaje han sido rebasadas en su funcionamiento hidráulico ocasionado por el acelerado crecimiento urbano o incluso por la falta de drenaje en algunas colonias de la ciudad.

Clima

Debido a su ubicación latitudinal y posición geográfica, Mexicali tiene un clima árido y seco con lluvias invernales de tan solo 75 mm de precipitación promedio anual, además, de tener uno de los climas más extremos de México con temperaturas máximas que han superado los 50° C durante el verano, y temperaturas inferiores a las 0°C durante el invierno (Cueto, O., et al., 2013; Chow, J. C., et al., 2000; García Cueto, O. R., et al., 2009).

Geología

La ciudad de Mexicali queda situada dentro de una zona de alta actividad sísmica. Las fallas que impactan a la Ciudad y Valle de Mexicali son:

La Falla Imperial localizada a 12 Km. al Este del Centro Cívico con una longitud de 75Km., corre de noreste a sureste pasando por los Ejidos Tamaulipas, Saltillo y Guerrero. La Falla de Cerro Prieto, dentro de la zona de influencia de esta falla se encuentra la ciudad de Mexicali, a una distancia aproximada de 30 Km. La Falla Cucapah que se localiza en la sierra del mismo nombre, está ubicada al Suroeste

del centro de población. La Falla de la Laguna Salada, se localiza al norte de la Laguna Salada, su actividad sísmica impacta a la ciudad. La Falla Michoacán se localiza paralela a la vía del ferrocarril y la carretera del Ejido Puebla al Michoacán de Ocampo (Programa de desarrollo urbano de centro de población de Mexicali 2025).

Edafología

La mayor parte de los suelos del área urbana y su entorno se consideran del tipo arcilloso expansivos de baja permeabilidad. Este tipo de suelos asociados a la escasa pendiente topográfica de la zona, dificulta y hace costosa cualquier obra de urbanización. Es importante señalar la presencia de suelos orgánicos en diversas áreas de la ciudad, en sitios que antiguamente fueron utilizados como rellenos sanitarios. Las implicaciones de estos suelos para el desarrollo urbano estriban en la inestabilidad de los mismos, producto de la lenta descomposición de la materia orgánica enterrada; además de la posibilidad de incendios en el subsuelo ocasionados por la presencia de biogas producto de la misma descomposición orgánica, ubicándose principalmente en las zonas bajas del Río Nuevo, este de la Laguna Xochimilco, dren Xochimilco (Campestre), dren Mexicali (Satélite), y Km. 14 carretera al aeropuerto (Programa de desarrollo urbano de centro de población de Mexicali 2025).

Cuenca hidrológica de Mexicali

La ciudad de Mexicali se encuentra ubicada dentro de la región hidrológica Numero 7 "Río Colorado". La conducción del agua del Río Colorado –principal fuente de abastecimiento– a la ciudad de Mexicali, se lleva a cabo a través del canal Benassini que forma parte del sistema de canales de riego del Valle de Mexicali. El canal tiene una longitud de 31.4 Km. se encuentra revestido de concreto, cuenta con una capacidad de 6.8 m³/seg. y abastece a la planta potabilizadora de donde es distribuida a la ciudad de Mexicali.

La Ciudad de Mexicali es cruzada por el Dren Mexicali que nace al Este de la ciudad dirigiéndose al sur y posteriormente hacia el norte, recibiendo en su recorrido aportes de aguas industriales, agrícolas y descargas domésticas. El Río Nuevo es

otra corriente que atraviesa la ciudad de sur a norte, el cual forma parte del sistema de drenaje natural y agrícola del Valle de Mexicali, su recorrido por la mancha urbana tiene una longitud de 9 Km. Actualmente se encuentra embovedado desde el Boulevard Lázaro Cárdenas hasta la línea Internacional con una longitud de 6 Km (Programa de desarrollo urbano de centro de población de Mexicali 2025).

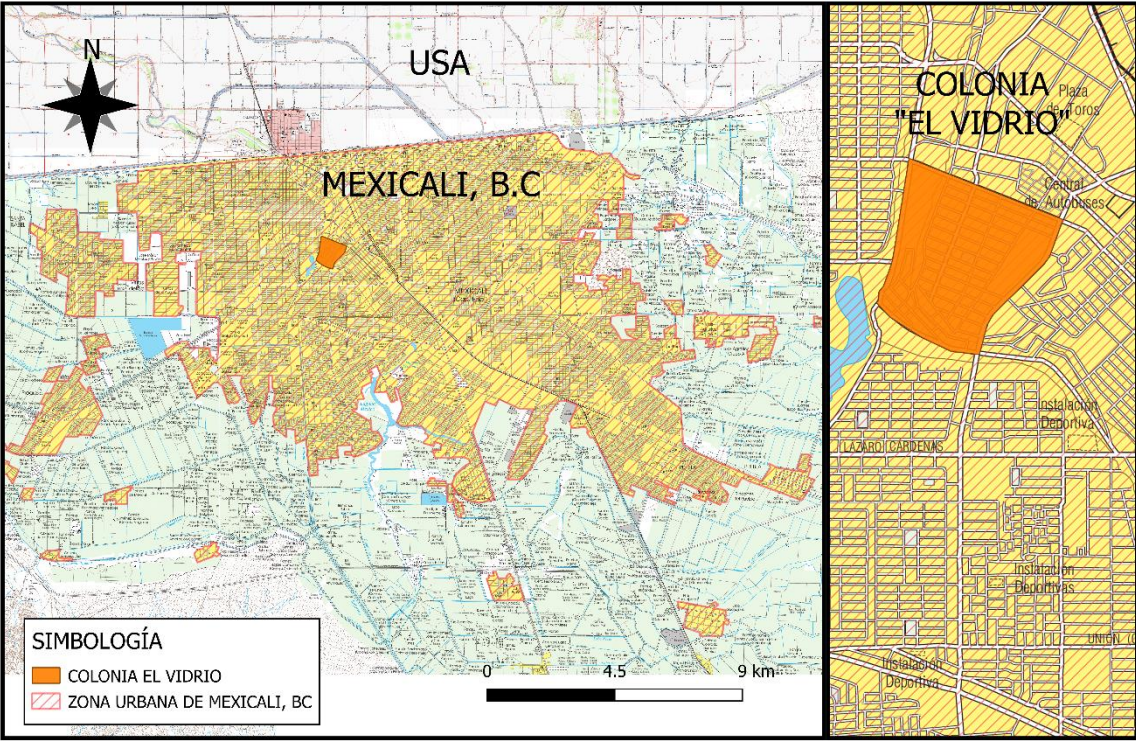


Figura 1 Zona de estudio "Colonia El Vidrio"

Capítulo 3. Materiales y Métodos

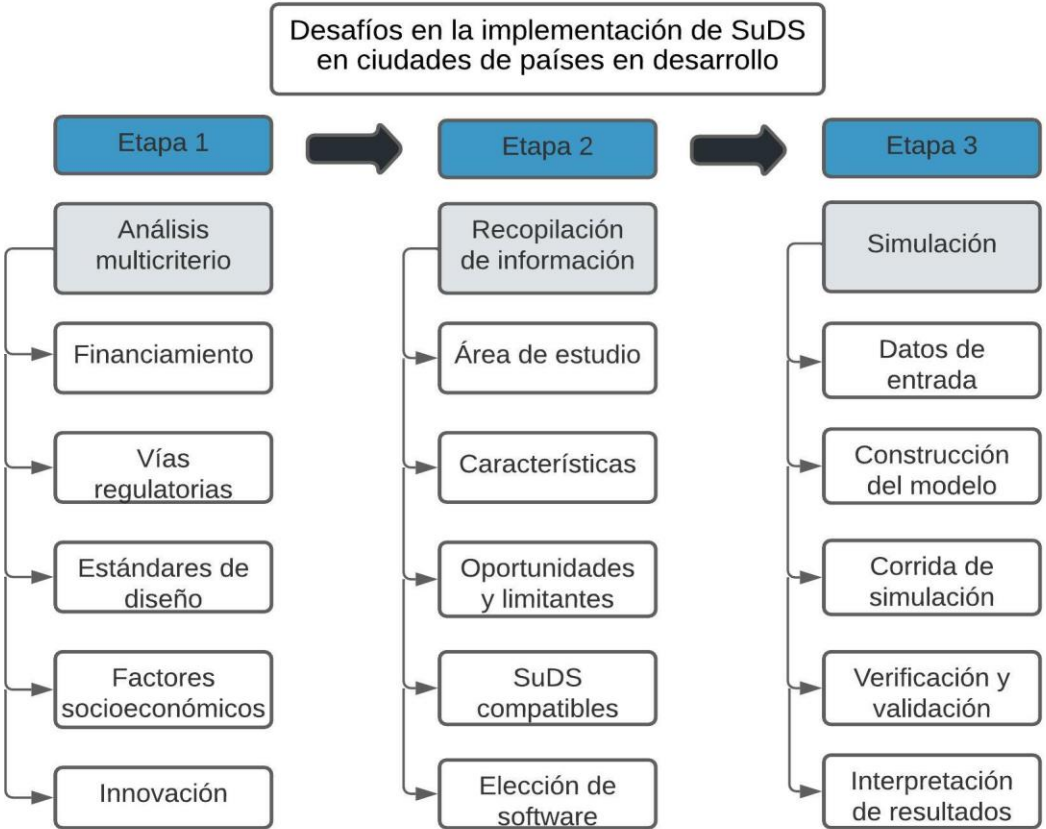
La presente investigación se elaboró mediante un proceso formado por tres etapas: La primera etapa consistió en una revisión de literatura acerca de las barreras que se presentan en todo el mundo en cuanto a la integración de los SuDS en el sistema pluvial de zonas urbanas como una alternativa para mitigar inundaciones repentinas. Basado en estudios previos (Staddon, C., et al,2018); (Zuniga-Teran, A. A., et al, 2020), se tomaron como los 5 desafíos principales el **financiamiento, vías regulatorias, estándares de diseño, factores socioeconómicos e innovación**, por lo que se indago en diversos artículos científicos publicados en revistas indexadas utilizando bases de datos especializadas (Scopus; Google Scholar). Con la información recopilada describimos cada una de estas barreras mediante ejemplos y soluciones que se han presentado recientemente, creando una tabla que muestra casos de estudio que han afrontado con éxito estos desafíos mediante el uso de diferentes metodologías y herramientas, mostrando una ruta para los países en desarrollo que les permita adentrarse en el uso de los SuDS como una herramienta de planeación urbana sustentable.

La segunda etapa se llevó a cabo una búsqueda de literatura del tema “Métodos y herramientas de simulación” en artículos científicos publicados en revistas indexadas, preferentemente de los cuartiles Q1 y Q2, utilizando bases de datos especializadas como Scopus y Google Scholar, para establecer los diferentes métodos y herramientas de modelación de sistemas pluviales que se han explorado en los últimos años. Con la información obtenida se elaboraron dos tablas:

En la primera tabla se muestra información recopilada de artículos que realizaron simulaciones pluviales con apoyo de softwares de modelación. Estos estudios consideraron diferentes variables, adaptando la simulación a la información disponible y a características particulares de su caso de estudio como superficie urbana, impermeabilidad y condiciones climatológicas. Para la segunda tabla, se compararon las diferentes herramientas (softwares) de modelación y simulación aplicadas en las investigaciones de la primera tabla. Se consideraron para la

comparación sus características, módulos y su accesibilidad. Adicionalmente, se realizó una evaluación de las técnicas de SuDS con mayor aplicabilidad en la colonia “El Vidrio” ubicada en la ciudad de Mexicali, BC, en base a los beneficios que se esperan obtener considerando las restricciones que la zona presenta, esto con apoyo de la tabla de características de los SuDS.

Finalmente, en la tercera etapa se tomó como caso de estudio “El Vidrio” una colonia ubicada en la ciudad de Mexicali, BC, para realizar una simulación de lluvia/escorrentía con la herramienta SWMM, proponiendo el diseño de un sistema pluvial urbano que integre SuDS para maximizar su potencial, buscando mitigar los problemas de inundación que la zona presenta, de esta forma se pretende obtener un modelo conceptual que nos permita identificar los desafíos hidrológicos e hidráulicos que las ciudades en países en desarrollo presentan en la modelación de inundaciones, buscando impulsar a futuros estudios para buscar la forma de abordar dicha escases de datos.



ETAPA 1

Análisis multicriterio

Mejorar la resiliencia urbana mediante la integración de los SuDS presenta desafíos importantes, entre estos, inestabilidad política, inconsistencia en los regímenes de planificación, déficits de capacidad, miedo al cambio, incertidumbre en el proceso, comprensión y aceptabilidad social (Staddon, C., et al, 2018).

El presente estudio se basa en investigaciones previas (Staddon, C., et al,2018); (Zuniga-Teran, A. A., et al, 2020) donde examinan 5 desafíos que presenta la integración de los SuDS en ciudades de todo el mundo: Financiamiento, Vías regulatorias, Estándares de diseño, Desafíos socioeconómicos e Innovación. Esto se logró mediante la recopilación de literatura que muestra que estos son los desafíos más comunes que enfrentan los casos de estudio, por lo que a continuación describimos cada una de estas barreras, ejemplos y soluciones que se han encontrado en la búsqueda de información a nivel global.

3.1 Financiamiento

Los resultados de diversos estudios muestran que el recurso económico es una limitante en todo el mundo que impide la implementación de estas infraestructuras sostenibles, sobre todo en los países en desarrollo (Tortajada, C., 2016, citado en Xiang, C., et al., 2019).

Anualmente los daños causados por inundaciones dejan pérdidas de más de \$104 mil millones en todo el mundo (Kundzewicz, Z. W., et al., 2014; citado en Li, L. et al., 2020).

Sin duda alguna, es necesario mejorar las metodologías actuales para medir el rendimiento de los SuDS como medida de mitigación de inundaciones urbanas, tomando en cuenta factores económicos y los múltiples beneficios que estos conllevan (Ossa-Moreno, J., et al., 2017).

La integración de los SuDS podría funcionar como un incentivo económico para las ciudades, ya que generalmente después de una inundación suelen haber pérdidas

económicas debido a la infraestructura dañada. El problema radica en como estimar los costos y beneficios de los SuDS de manera confiable para proponer un modelo de financiamiento atractivo (Zuniga-Teran, A. A., et al, 2020). Es necesario realizar análisis de costos que consideren los servicios ecosistémicos que los SuDS proporcionan, ya que, aunque los costos de instalación suelen ser elevados, los SuDS son rentables a largo plazo (Zuniga-Teran, A. A., et al, 2020).

Por ejemplo, los pavimentos permeables son una técnica de SuDS que reduce eficazmente las superficies impermeables, sin embargo, su alto costo inicial y de mantenimiento dificulta su integración en las ciudades especialmente en los países en desarrollo (Gogate, N. G., et al, 2017).

Otra problemática que se presenta constantemente es la propiedad de los SuDS, ya que al involucrarse varias partes interesadas es difícil definir quien queda a cargo de la financiación y el mantenimiento de los SuDS (Cotterill, S., & Bracken, L. J., 2020).

En Ossa-Moreno, J., et al., (2017), muestran un caso de estudio en Decoy Brook (Londres) donde se definió un periodo de 50 años para comparar los beneficios y costos de algunos SuDS. Este estudio muestra una guía de cómo se deben dividir los costos de financiamiento y mantenimiento de los SuDS entre las diversas partes interesadas, basándose en los beneficios que obtendrán, lo que conlleva a la obtención de fondos y al mismo tiempo promueve la integración de los SuDS.

Otra forma de ayudar a integrar los SuDS es mediante las multas y los incentivos económicos a escala de hogares en las ciudades (Zuniga-Teran, A. A., et al, 2020).

El desafío financiero es aún mayor en los países tropicales y subtropicales como Brasil, ya que las condiciones climáticas extremas generan conflictos entre todas las partes involucradas (McClymont, K., et al. 2020).

En China para el proyecto “Sponge City” se creó un presupuesto de 13 mil millones de dólares para las 30 ciudades piloto. Para obtener el financiamiento de los proyectos, el gobierno central fomenta la inversión del sector privado mediante acuerdos innovadores como asociaciones público-privadas (Jiang, Y., et al, 2018).

3.2 Vías regulatorias

La escasa participación de los organismos reguladores en la integración de los SuDS y sus beneficios en las ciudades sigue siendo un desafío importante (Kremer et al. 2016).

La difusión de los SuDS mediante informes y normativas ha provocado su adopción en diferentes países (Field, C. B., et al., 2012). Algunos países desarrollados como Estados Unidos, Australia, Reino Unido y en toda Europa los SuDS han sido incluidos en las regulaciones de gobernanza (Benton-Short, L. et al., 2019; Roy, A. H., et al., 2008; Melville-Shreeve, P., et al., 2018; Eggermont, H., et al., 2015; citado en Barros Ramalho Alves, P. et al., 2020). En España, la implementación de los SuDS fue considerada en la legislación nacional en 2016, donde se establece que los nuevos polígonos industriales y desarrollos urbanos deben considerar sistemas de drenaje urbanos sostenibles para reducir la vulnerabilidad ante inundaciones (Andrés-Doménech, I., et al, 2021).

Como consecuencia del aumento de eventos de inundaciones urbanas, China lanzó en 2014 la iniciativa nacional “Sponge City” como una estrategia para mitigar las inundaciones urbanas mediante una serie de políticas y programas. Mediante estas acciones el gobierno de China espera mejorar el desarrollo urbano tomando en cuenta el ciclo del agua urbano, estableciendo un marco regulatorio (Jiang, Y., et al, 2018).

En el Reino Unido, la integración de los SuDS para mitigar los riesgos de inundaciones es asesorado por la Asociación de Investigación e Información de la Industria de la Construcción (CIRIA), mediante una guía de diseño, el Marco de Política Nacional de Planificación, mapas de oportunidades de la Sociedad Geológica Británica, y la colaboración con la Agencia de Medio Ambiente y Autoridades Locales de Inundaciones (LLFA) (Lashford, C., et al, 2019).

Actualmente en Seúl se está trabajando para implementar sistemas de consulta previa y una organización que brinde asesoría de las políticas de circulación de agua, proporcionando información relevante de diferentes técnicas de SuDS,

incluyendo su propósito, beneficios, costos y mantenimiento, con el objetivo de apoyar a los legisladores en la toma de decisiones (Shafique, M., & Kim, R. 2018).

Dhakar, K. P., & Chevalier, L. R. (2017), analizaron las políticas de 10 ciudades de Estados Unidos, para diagnosticar los desafíos que enfrenta la integración de los SuDS así como políticas que ayuden a superar estas barreras. Identificaron 29 barreras, donde la mayoría son limitaciones cognitivas y socio-institucionales, y para contrarrestar estas barreras proponen un conjunto de 33 políticas que incluyen programas de educación y concientización, cambio de políticas y estructuras de gobierno.

3.3 Estándares de diseño

La planificación, diseño, implementación, operación, mantenimiento y evaluación exitosos de la integración de los SuDS dependen de los estándares de diseño de cada ciudad, ya que cada una cuenta con problemáticas específicas y una disponibilidad de recursos distinta (Li, H., et al. 2017). Cada ciudad debe optar por sus propias técnicas de diseño considerando las necesidades de sus ciudadanos basándose en los datos de desempeño (Zuniga-Teran, A. A., et al, 2020).

Por ejemplo, en (McClymont, K., et al 2020) se tomó como caso de estudio la ciudad de São Carlos, Brasil, utilizando un modelo que integra los cuatro pilares del diseño de SuDS, basándose en el Manual de SuDS de Reino Unido para considerar otros factores como ambientales, sociales y económicos con el objetivo de promover la resiliencia urbana. El costo de mantenimiento de los SuDS fue uno de los desafíos clave en cuanto a su integración. Otro punto a destacar es que mostró una compensación entre el costo y los valores de resiliencia.

Un estudio (Andrés-Doménech, I., et al, 2021) elaboró un cuestionario a administradores locales, empresas de agua, consultores, investigadores y empresas constructoras para evaluar las necesidades a nivel local y regional, los resultados mostraron que los encuestados identificaron como las principales barreras en la adopción de los SuDS la incertidumbre de los costos, déficit de información sobre su vida útil y el mantenimiento de estas infraestructuras.

En 2016, la Institución Colegiada de Gestión del Agua y el Medio Ambiente (CIWEM), realizó un cuestionario a gran escala a profesionales “The Big SuDS Survey”, los resultados mostraron que el 75% de los encuestados consideran que las autoridades locales carecen de experiencia, capacidad y habilidades de planificación para evaluar y asesorar sobre la integración de los SuDS (Cotterill, S., & Bracken, L. J., 2020).

3.4 Factores socioeconómicos

Se ha demostrado que una mala integración de los SuDS puede ocasionar una mayor desigualdad social, donde comunidades que se encuentran en entornos desfavorables se ven obligadas a desplazarse, impidiéndoles disfrutar de los beneficios de los servicios ecosistémicos que los SuDS ofrecen (Staddon, C., et al, 2018). Algunas ciudades de América Latina muestran altas tasas de crecimiento, donde no hay una planificación y a menudo se presentan altos niveles de desigualdad ambiental y socioeconómica. Un ejemplo es la Ciudad de México, donde la implementación de SuDS se distribuye de manera desproporcionada tomando en cuenta factores como la densidad, la pobreza, educación y edad (Zuniga-Teran, A. A., et al, 2020).

Se ha probado que la aceptación de los SuDS por los ciudadanos minimiza los costos, aumenta la sostenibilidad y la satisfacción de la comunidad, por lo que la inclusión social es un elemento clave para aumentar la resiliencia urbana (Staddon, C., et al, 2018).

En (Jiménez Ariza, S. L., et al, 2019) proponen una metodología donde se analizaron criterios sociales y ambientales con la ayuda de talleres, para identificar lugares con población vulnerable y malas condiciones ambientales. En esta investigación se basaron en estudios previos similares para definir los criterios seleccionados.

En (Loc, H. H., et al, 2017) muestran cómo caso de estudio la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam, donde se realizaron entrevistas cara a cara con cuestionarios estructurados en las comunidades más vulnerables a inundaciones, clasificando en

tres grupos: ingresos altos, ingresos medios y bajos ingresos, los tres grupos mostraron preocupación por la mitigación de inundaciones. El grupo de altos ingresos considera que la estética es el segundo criterio más relevante mientras que los grupos de ingresos medios y bajos mostraron más preocupación por la eliminación de contaminantes (Loc, H. H., et al, 2017).

The UK's Benefits of SuDS Tool ('BeST'; SuDS refers to sustainable drainage systems) (CIRIA. 2017) es una herramienta para evaluar los beneficios de los SuDS, esta cuenta con una categoría de beneficios sociales que considera las comodidades, temperaturas del edificio, delincuencia, educación, salud, recreación y tráfico (Ward, S., et al, 2019).

Cotterill, S., & Bracken, L. J. (2020) realizaron un estudio donde involucraron a las comunidades en el diseño y la integración de SuDS en la comunidad de South Moor, con el fin de impulsar la adopción, concienciación y educación mediante el uso de tecnologías digitales y de comunicación. Estos integraron a la comunidad a través de licitaciones para propuestas de monitoreo de las aguas superficiales, donde se planificaron diversas actividades como plantar cestas colgantes, quitar las malas hierbas de los jardines de lluvia, y mediante una gama de actividades de divulgación, de esta forma los participantes aprendieron habilidades sobre los SuDS, para aplicarlas incluso en los patios de sus propiedades.

3.5 Innovación

La mejor forma de afrontar el desafío de innovación es mediante los proyectos pilotos con resultados positivos de la integración de los SuDS, ya que de esta forma las ciudades pueden aprender unas de otras, contando con mejores oportunidades (Zuniga-Teran, A. A., et al 2020). En 2014, China lanzó el programa "Sponge City", para implementar una serie de proyectos en distintas ciudades. En 2015 se seleccionaron las primeras 16 ciudades piloto y en 2016 se complementó con otras 14 ciudades piloto. Investigadores han realizado diversos estudios comparativos y analíticos sobre estas pruebas piloto desde su implementación hasta en la actualidad (Zevenbergen, C., et al, 2018).

Para afrontar el desafío de la innovación es necesario la colaboración entre científicos, ingenieros, planificadores, desarrolladores y políticos para brindar alternativas de solución en la integración de los SuDS, buscando la participación de los ciudadanos (Tayouga y Gagné, 2016). En (Zevenbergen, C., et al, 2018) destacan que para lograr implementar exitosamente el concepto de “Sponge City” es necesario aprender de experiencias de todo el mundo, por ejemplo, durante los últimos 30 años Estados Unidos, la Unión Europea y Australia han producido grandes avances en la integración de los SuDS para mitigar problemas de agua urbana. Shafique, M., & Kim, R. (2018), señalan que las investigaciones avanzadas y aplicaciones profundas sobre la integración de los SuDS son necesarias para desarrollar herramientas innovadoras en Corea del Sur, considerando sus condiciones climáticas, ya que la mayoría de las pautas existentes son aplicadas en climas fríos como Estados Unidos, Canadá y Europa.

ETAPA 2

Métodos y modelos de simulación

Los sistemas de drenaje pluvial actuales necesitan actualizarse y adaptarse a diversos escenarios futuros para poder seguir cumpliendo su función, por lo que es necesario considerar otros factores al momento de diseñar la red (Huong, H. T. L., & Pathirana, A., 2013). Los modelos de simulación del sistema pluvial de drenaje urbano son una herramienta fundamental para las administraciones públicas y para los tomadores de decisiones (Beck, M. B., 2005). El objetivo de una simulación del alcantarillado pluvial durante un evento de precipitación consiste en representar de la forma más precisa posible lo que sucede en la vida real, sin embargo, existe una gran cantidad de datos que intervienen en un modelo de simulación a los cuales por lo general los países en desarrollo no tienen acceso, por lo que se debe simplificar el modelo y buscar nuevas estrategias (Yang, Q., et al, 2018).

La complejidad de una red de alcantarillado pluvial y los diversos parámetros que intervienen en el diseño, además de la falta de datos hidrológicos, aumentan la vulnerabilidad ante eventos de precipitación. La cantidad y la calidad de los datos con los que se cuentan al momento de diseñar, determinan que tan preciso será un modelo de simulación ante adversas situaciones de precipitación (Czubski, K., et al, 2013) (Dai, Q., et al, 2015) (Hunter, N. M., et al, 2008) (WAŁĘGA, A., & KSIAŻEK, L., 2015). En países en vías de desarrollo el problema se agrava debido a la limitación tecnológica que se presenta en estas zonas (Li, Z., et al, 2014). Según diversos autores (Hutchins, M. G., et al, 2017) (Kang, R. S., & Marston, R. A., 2006) (Yu, D., & Coulthard, T. J., 2015), el modelado y la simulación de inundaciones presentan mayores limitaciones y desafíos para los países en desarrollo, y aún más específicamente en áreas urbanas, ya que estas requieren mayores datos de entrada debido a que presentan un sistema de drenaje más complejo ya que intervienen flujos de agua superficial y subterránea.

La precisión de un modelo de inundaciones urbanas dependerá de la forma en que se equilibren los datos disponibles, el tiempo de cálculo y bajo que contexto se lleve a cabo la modelación (Henonin, J., et al. 2013; van Dijk, E., et al. 2014).

Existen diversas herramientas de apoyo que se utilizan actualmente para simular inundaciones, por ejemplo, el SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) es un modelo creado por la Agencia de Protección Ambiental para simular procesos de lluvia-escorrentía en zonas urbanas (Huber, W. C., et al., 1988). Además, algunas de estas herramientas de simulación cuentan con módulos de infraestructura sostenible para mitigar las inundaciones.

La elección de un software va dependiendo de los objetivos de cada estudio, tomando en cuenta los datos de entrada disponibles, si se requerirá de la combinación con otros softwares, ya sea para la generación de mapas, el diseño de la red pluvial, proyección de eventos de precipitación, proyección del crecimiento urbano.

Actualmente, una de las mejores alternativas para combatir el riesgo de inundaciones en zonas urbanas es la implementación de los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS), ya que estos sistemas buscan restaurar el ciclo natural del agua (Charlesworth, S. M., 2010). Llevando un correcto análisis de su ubicación, estos pueden tener una mayor eficiencia contra la mitigación de inundaciones (Jato-Espino, D., et al, 2016).

El rendimiento de algunos SuDS como los jardines de lluvia, cunetas verdes y áreas de biorretención dependen directamente de la tasa de infiltración de la zona (Muthanna, T. M., et al., 2018). El rendimiento de los SuDS depende en gran medida de las condiciones in situ, por lo que es fundamental un análisis de su ubicación para maximizar sus beneficios antes de seguir con el proceso de urbanización (Muthanna, T. M., et al., 2018). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han sido utilizados con una herramienta de apoyo en la elección de áreas potenciales de colocación de SuDS (Muthanna, T. M., et al., 2018).

ETAPA 3

Simulación de Lluvia / Escorrentía

El SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) cuenta con un módulo para simular procesos de lluvia/escorrentía, para esto es necesario contar con los siguientes parámetros:

- Pluviómetro asignado
- Nodo donde descarga la cuenca representada
- Usos de suelo
- Áreas y superficies tributarias
- Porcentaje de impermeabilidad
- Pendiente de la cuenca
- Anchura característica del flujo en superficie
- Valor del coeficiente de Manning n (áreas permeables y áreas impermeables)
- Almacenamiento en depresión (áreas permeables y áreas impermeables)
- Porcentaje de suelo impermeable carente de almacenamiento en depresión

El SWMM cuenta con las siguientes opciones para realizar la modelación:

Tabla 2. Opciones de simulación en SWMM

Unidades de flujo	Litros por segundo (LPS)
Modelo de infiltración	Horton
	Horton modificado
	Green ampt.
	Green ampt. modificado
	Numero de curva
Método de enrutamiento	Flujo constante
	Onda cinemática
	Onda dinámica
Ecuación principal de fuerza	Hazen-Williams
	Darcy-Weisbach

Para la presente investigación, se seleccionó el Numero de Curva del SCS como modelo de infiltración debido a que es el más comúnmente utilizado ya que

considera más variables. Como método de enrutamiento se consideró la Onda dinámica, ya que permite manejar todas las variables de conservación de masa y cantidad de movimiento. Y la ecuación principal de fuerza para este estudio es la de Darcy-Wersbach ya que permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería llena.

Selección de los datos

Según las características del caso de estudio seleccionado (Colonia El Vidrio, Mexicali, Baja California), se obtuvieron los siguientes valores para la modelación:

- Porcentaje de área impermeable (%imperv) = 85%
- Coeficiente de rugosidad del área impermeable (N-Imperv) = 0.013
- Coeficiente de rugosidad del área permeable (N-Perv) = 0.13
- Altura de la depresión del suelo impermeable (Dstore-Imperv) = 1.27 mm
- Altura de la depresión del suelo permeable (Dstore-Perv) = 5.08 mm
- Porcentaje de suelo impermeable que no presenta almacenamiento o depresión (%Zero-Imperv) = 25%

Análisis de la precipitación

Para obtener la lluvia de diseño se procedió a la construcción de curvas I-D-TR con registros pluviométricos de la estación MEXICALI (DGE) con clave 2033 ubicada en Mexicali, Baja California.

Para diseñar y simular el sistema pluvial de la zona de estudio Colonia “El Vidrio” ubicada en Mexicali B. C., se seleccionaron periodos de retorno de 10, 25 y 50 años para un evento de lluvia con una duración de 1 hora. Los hietogramas utilizados con datos de entrada asignados al pluviómetro para el modelo fueron los siguientes:

Duración de la tormenta (h): 1

Intensidad de la lluvia: 15.76

Precipitación en 24 hrs: 15.76

Intervalos de tiempo (min): 5

Tabla 3 Hietograma Tr 10 años

Int. Tiempo	(mm)
00:00	0
00:05	0.590
00:10	0.683
00:15	0.825
00:20	1.075
00:25	1.639
00:30	4.459
00:35	2.340
00:40	1.288
00:45	0.930
00:50	0.746
00:55	0.632
00:60	0.553

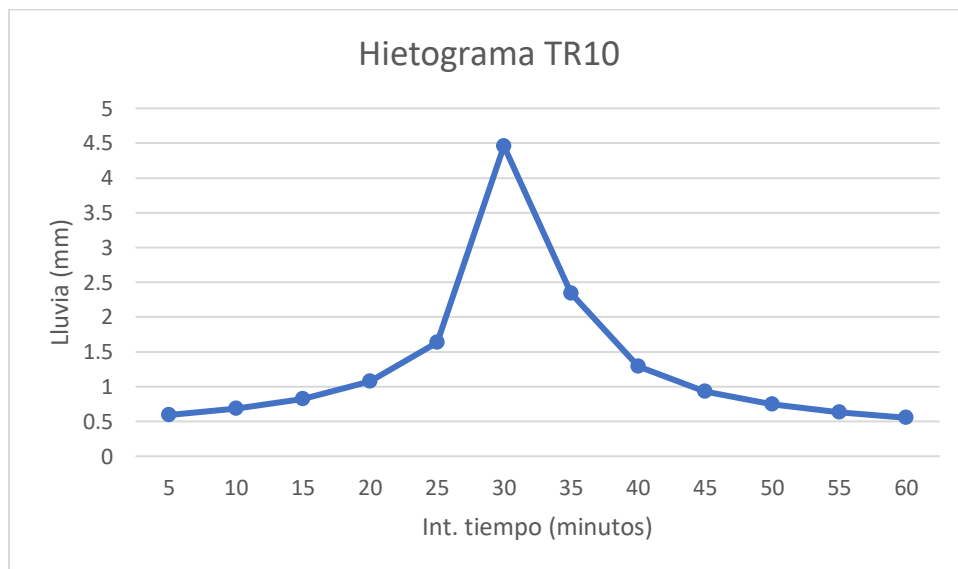


Figura 2. Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 10 años

Duración de la tormenta (h): 1
Intensidad de la lluvia: 20.099
Precipitación en 24 hrs: 20.099
Intervalos de tiempo (min): 5

Tabla 4 Hietograma Tr 25 años

Int. Tiempo	(mm)
00:00	0
00:05	0.751
00:10	0.871
00:15	1.053
00:20	1.370
00:25	2.092
00:30	5.686
00:35	2.984
00:40	1.642
00:45	1.187
00:50	0.951
00:55	0.806
00:60	0.706

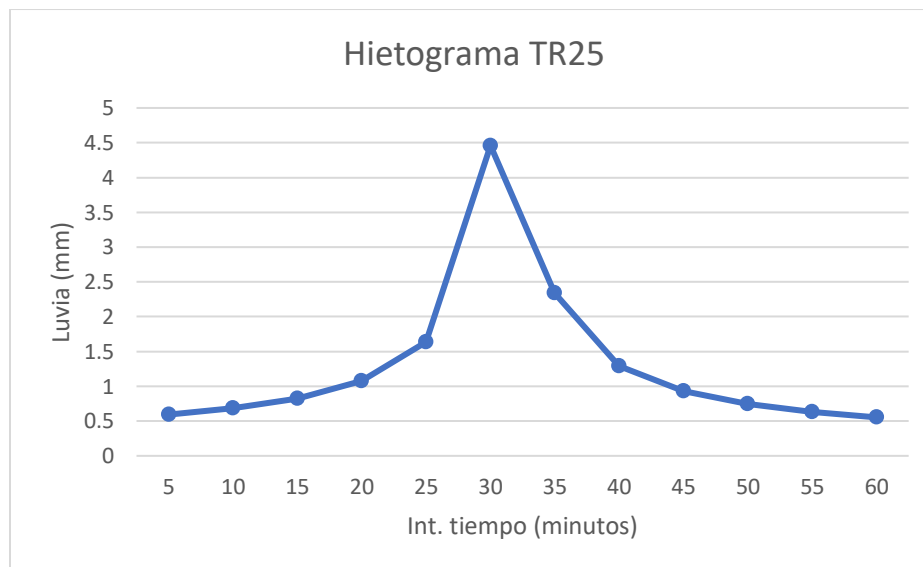


Figura 3 Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 25 años

Duración de la tormenta (h): 1
Intensidad de la lluvia: 23.381
Precipitación en 24 hrs: 23.381
Intervalos de tiempo (min): 5

Tabla 5 Hietograma Tr 50 años

Int. Tiempo	(mm)
00:00	0
00:05	0.874
00:10	1.013
00:15	1.225
00:20	1.594
00:25	2.433
00:30	6.615
00:35	3.471
00:40	1.911
00:45	1.380
00:50	1.107
00:55	0.937
00:60	0.821

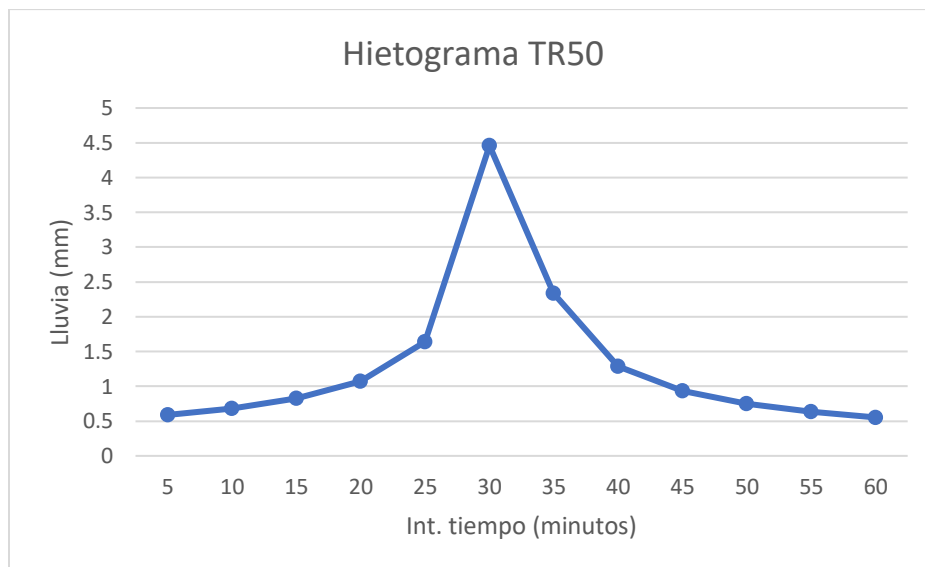


Figura 4 Hietograma de 1 hora de lluvia con periodo de retorno de 50 años

Para iniciar con el diseño del sistema pluvial de la Colonia “El Vidrio” en el software SWMM, se importó una imagen georreferenciada obtenida con apoyo de Google Earth Pro para permitir la digitalización de subcuencas y el cálculo automático de áreas. Se utilizaron las siguientes coordenadas UTM:

Inferior izquierda

Coordenada en X: 641,382.269

Coordenada en Y: 3´611,084.000

Superior derecha

Coordenada en X: 643,739.831

Coordenada en Y: 3´612,410.620

Utilizando la imagen de fondo, se llevó a cabo una propuesta de un sistema pluvial debido a que el caso de estudio no cuenta con drenaje pluvial. El sistema consta de 24 conductos de tubería circular con un diámetro de 0.45 m y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.009 (obtenido de Anexo: Tabla XX) para lo cual se utilizaron los siguientes datos de entrada:

Tabla 6 Propiedades de las tuberías

PROPIEDADES DE TUBERIAS		
ID	Longitud (m)	Rugosidad
T-1	110.54	0.009
T-2	83.96	0.009
T-3	169.13	0.009
T-4	47.66	0.009
T-5	76.43	0.009
T-6	73.83	0.009
T-7	81.25	0.009
T-8	47.39	0.009
T-9	174.08	0.009
T-10	166.31	0.009
T-11	42.39	0.009
T-12	58.73	0.009
T-13	54.13	0.009
T-14	61.68	0.009
T-15	57.11	0.009
T-16	53.94	0.009

T-17	9.9	0.009
T-18	33.33	0.009
T-19	70.39	0.009
T-20	37.62	0.009
T-21	37.38	0.009
T-22	138.97	0.009
T-23	78.64	0.009
T-24	96.6	0.009

También se compone de 21 pozos de visita y 2 salidas ya que la red se divide en 2 partes, las cotas de elevación fueron obtenidas mediante visitas en campo. Se utilizaron los siguientes datos de entrada:

Tabla 7 Propiedades de los pozos

PROPIEDADES DE POZOS	
ID	Elevación (m)
P-1	-6.62
P-2	-7.1
P-3	-7.69
P-4	-8.45
P-5	-8.62
P-6	-8.86
P-7	-9.68
P-8	-9.46
P-9	-9.21
P-10	-7.63
P-11	-8.52
P-12	-8.16
P-13	-6.73
P-14	-6.29
P-15	-3.66
P-16	-7.09
P-17	-8.81
P-18	-8.49
P-19	-7.77
P-20	-7.91
P-21	-8.96
Salida 2	-9.51
Salida 1	-9.72

En la siguiente figura se muestra la propuesta de diseño del sistema pluvial para la Colonia "El Vidrio", ubicada en la ciudad de Mexicali, B. C.



Figura 5 Propuesta de sistema pluvial para "El Vidrio"

La cuenca que abarca la zona de estudio fue dividida en un total de 23 subcuencas. Los datos requeridos como el área, ancho y pendiente de las subcuencas fueron obtenidos calculados en el mismo software SWMM. La N imperv y la N perv fueron obtenidas de la de Anexo: Tabla XX.

Tabla 8 Propiedades de las subcuencas

Subcuenca	Área (ha)	Imper.	Width (Ancho)	Slope (pendiente)	N imperv	N perv
S-1	0.65	85	59.28	-0.40	0.013	0.13
S-2	0.41	85	32.43	-0.63	0.013	0.13
S-3	0.24	85	39.33	0.80	0.013	0.13
S-4	0.51	85	46.31	-1.70	0.013	0.13
S-5	0.43	85	61.1	-1.02	0.013	0.13
S-6	0.44	85	57.85	0.31	0.013	0.13
S-7	0.43	85	41.65	-0.40	0.013	0.13
S-8	0.54	85	52.85	-0.46	0.013	0.13
S-9	0.46	85	57.74	-0.40	0.013	0.13
S-10	0.27	85	49.07	-0.41	0.013	0.13
S-11	0.38	85	61.12	0.31	0.013	0.13
S-12	0.42	85	47.03	-0.40	0.013	0.13
S-13	0.55	85	56.66	-0.41	0.013	0.13
S-14	0.62	85	47.29	-1.44	0.013	0.13
S-15	0.46	85	39.11	-0.40	0.013	0.13
S-16	0.52	85	55.51	-2.44	0.013	0.13
S-17	0.31	85	24.85	-2.44	0.013	0.13
S-18	0.25	85	26.31	-2.79	0.013	0.13
S-19	0.41	85	36.22	-0.40	0.013	0.13
S-20	0.37	85	41.39	-0.40	0.013	0.13
S-21	0.61	85	78.44	-0.41	0.013	0.13
S-22	0.45	85	52.69	-0.40	0.013	0.13
S-23	0.62	85	78.09	-0.75	0.013	0.13

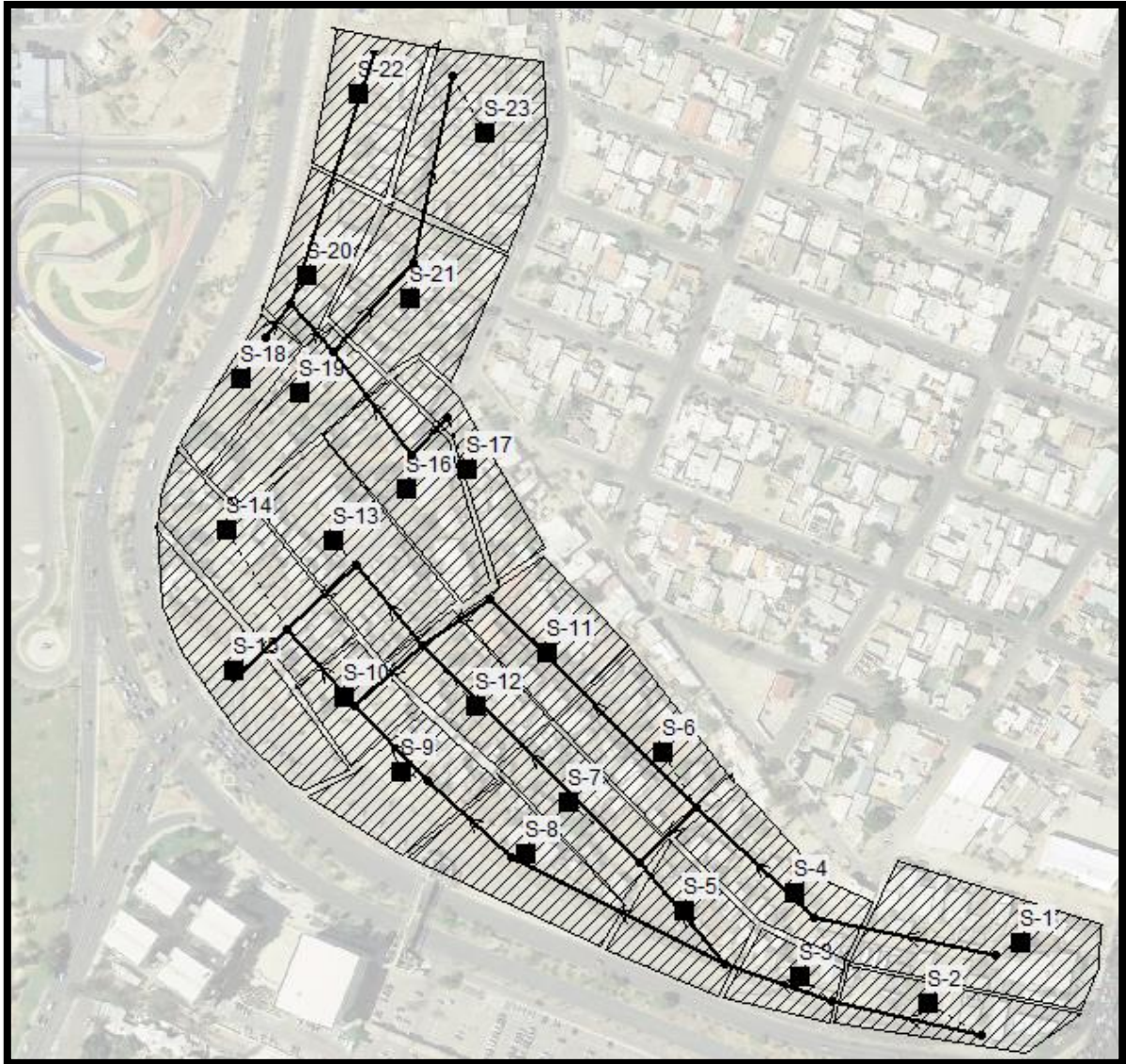


Figura 6 Subcuencas de aportación en la zona de estudio "El Vidrio"

Datos de entrada para los SuDS

Basándonos en la literatura, las recomendaciones de los manuales y las características del caso de estudio seleccionado (Colonia El Vidrio, Mexicali, Baja California), se obtuvieron los siguientes valores para la modelación:

Surface / Superficie

Berm Height / Altura de berma (in o mm) (profundidad máxima a la que el agua puede acumularse sobre la superficie de la unidad antes de que ocurra el desbordamiento). En el caso de los barriles de lluvia es la altura del barril (in o mm)

Vegetation Volume Fraction / Fracción de volumen de vegetación (Este es el volumen que ocupan los tallos y las hojas, no su superficie de cobertura. Normalmente, este volumen se puede ignorar, pero puede llegar a ser de 0,1 a 0,2 para un crecimiento vegetativo muy denso)

Surface Roughness / Rugosidad superficial (Mannings n) (La n de Manning para el flujo terrestre sobre la cubierta superficial del suelo, el pavimento, la superficie del techo o la ciénaga vegetal. Utilice 0 para otros tipos de LID).

Surface Slope / Pendiente de superficie (porcentaje) (Pendiente de una superficie de techo, superficie de pavimento o cuneta verde. Utilice 0 para otros tipos de LID)

Swale Side Slope / Pendiente lateral de cuneta (carrera/subida) (Talud de las paredes laterales de la sección transversal de una cuneta verde. Este valor se ignora para otros tipos de LID)

Soil / Suelo

Thickness / Espesor (in o mm) (Los valores típicos varían de 18 a 36 pulgadas (450 a 900 mm) para jardines de lluvia, jardineras de calles y otros tipos de unidades de biorretención en tierra, pero solo de 3 a 6 pulgadas (75 a 150 mm) para techos verdes.)

Porosity / Porosidad (fracción de volumen) (El volumen del espacio poroso relativo al volumen total del suelo)

Field Capacity / Capacidad de campo (fracción de volumen) (Volumen de agua intersticial en relación con el volumen total después de que se ha permitido que el suelo se drene por completo)

Wilting Point / Punto de marchitamiento (fracción de volumen) (Volumen de agua intersticial relativo al volumen total para un suelo bien seco donde solo queda agua ligada)

Conductivity / Conductividad (in/hr o mm/hr) (Conductividad hidráulica para el suelo completamente saturado)

Conductivity Slope / Pendiente de conductividad (Pendiente de la curva de log(conductividad) frente al contenido de humedad del suelo (adimensional). Los valores típicos oscilan entre 30 y 60. Se puede estimar a partir de un análisis de tamaño de grano de suelo estándar como 0,48 (% arena) + 0,85 (% arcilla).

Suction Head (in o mm) / Cabeza de succión (in o mm) (El valor promedio de la succión capilar del suelo a lo largo del frente húmedo (pulgadas o mm). Este es el mismo parámetro que se usa en el modelo de infiltración Green-Ampt.)

Storage / Almacenamiento

Thickness / Espesor (in o mm) (Este es el espesor de una capa de grava o la altura de un barril de lluvia (pulgadas o mm). Las capas de piedra triturada y grava suelen tener un espesor de 6 a 18 pulgadas (150 a 450 mm), mientras que los barriles de lluvia de casas unifamiliares varían en altura de 24 a 36 pulgadas (600 a 900 mm).)

Void Ratio / Relación de vacíos (Vacíos / Sólidos) (El volumen del espacio vacío relativo al volumen de sólidos en la capa. Los valores típicos oscilan entre 0,5 y 0,75 para lechos de grava)

Seepage Rate / Tasa de infiltración (in/hr o mm/hr) (Por lo general, sería la conductividad hidráulica saturada de la subcuenca circundante si se utiliza la infiltración Green-Ampt o la tasa de infiltración mínima para Horton infiltración. Si hay un piso o revestimiento impermeable debajo de la capa, use un valor de 0)

Clogging Factor / Factor de obstrucción desagüe (Volumen total de escorrentía tratada que se necesita para obstruir completamente el fondo de la capa dividido por el volumen vacío de la capa. Utilice un valor de 0 para ignorar la obstrucción.)

Underdrain / Desagüe

Flow Coefficient / Coeficiente de flujo

Flow Exponent / Exponente de flujo

El coeficiente de drenaje C y el exponente n determinan la tasa de flujo a través de un drenaje en función de la altura del agua almacenada por encima de la compensación del drenaje. La siguiente ecuación se utiliza para calcular este caudal (por unidad de área de la unidad LID):

$$q = C h^n$$

donde q es el flujo de salida (pulgadas/hora o mm/hora) y h es la altura del medio saturado sobre el drenaje (pulgadas o mm). Un valor típico para n sería 0,5 (haciendo que el drenaje actúe como un orificio). Tenga en cuenta que las unidades de C dependen del sistema de unidades que se utilice, así como del valor asignado a n. Si la capa no tiene drenaje, establezca C en 0

Offset Height / Altura de desplazamiento (in o mm) (Esta es la altura de la línea de drenaje por encima del fondo de una capa de almacenamiento o barril de lluvia)

Drain Delay / Demora de drenaje (horas) (El número de horas de clima seco que deben transcurrir antes de que se abra la línea de drenaje en un barril de lluvia (se supone que la línea se cierra una vez que comienza la lluvia). Un valor de 0 significa que la línea de drenaje del barril siempre está abierta y drena continuamente. Este parámetro se ignora para otros tipos de LID.)

Drainage Mat / Estera de drenaje

Thickness / Espesor (in o mm) (El grosor de la estera o placa (pulgadas o mm). Por lo general, oscila entre 1 y 2 pulgadas)

Void Fraction / Fracción nula (La relación entre el volumen vacío y el volumen total en el tapete. Suele oscilar entre 0,5 y 0,6.)

Roughness / Rugosidad (Mannings n) (Esta es la constante n de Manning utilizada para calcular el caudal horizontal de agua drenada a través de la malla. No es una especificación de producto estándar proporcionada por los fabricantes y, por lo tanto, debe estimarse. Los estudios de modelado anteriores han sugerido usar un valor relativamente alto, como de 0,1 a 0,4.)

Pavement / Pavimento

Thickness / Espesor (in o mm) (El espesor de la capa de pavimento. Los valores típicos son de 4 a 6 pulgadas (100 a 150 mm))

Void Ratio / Relación de vacíos (vacíos/sólidos) (El volumen del espacio vacío relativo al volumen de sólidos en el pavimento para sistemas continuos o para el material de relleno usado en sistemas modulares. Los valores típicos para pavimentos son 0,12 a 0,21. Tenga en cuenta que porosidad = relación de vacíos / (1 + relación de vacíos))

Impervious Surface Fraction / Fracción de superficie impermeable (Proporción de material de adoquín impermeable al área total para sistemas modulares; 0 para sistemas de pavimento poroso continuo)

Permeability / Permeabilidad (in/h o mm/h) (Permeabilidad del hormigón o asfalto utilizado en sistemas continuos o conductividad hidráulica del material de relleno (grava o arena) utilizado en sistemas modulares)

Clogging Factor / Factor de obstrucción (Número de volúmenes vacíos de escorrentía de la capa de pavimento tratados que se necesitan para obstruir completamente el pavimento. Utilice un valor de 0 para ignorar la obstrucción.)

Celdas de biorretención

Los datos de entrada necesarios para integrar las celdas de biorretención fueron obtenidos de (Lewis A. Rossman & Wayne C. Huber (2016)). Los parámetros finales se fijaron mediante la literatura, las características de la zona de estudio y las recomendaciones del manual de la EPA. Se colocó una unidad de celda de biorretención en cada una de las 23 subcuencas dentro de la zona de estudio. El área para cada celda de biorretención varía en cada subcuenca debido a que, por recomendaciones técnicas, para un correcto funcionamiento las celdas de biorretención deben abarcar al menos un 10 % del área total de la subcuenca.

Tabla 9 Parámetros de entrada en SWMM para Celdas de biorretención

Surface		Soil		Storage		Underdrain	
Berm Height (in or mm)	150	Thickness (in or mm)	450	Thickness (in or mm)	150	Flow Coefficient	0
Vegetation Volume Fraction	0.0	Porosity (volumen fraction)	0.35	Void Ratio (Voids / Solids)	0.75	Flow Exponent	0.5
Surface Roughness (Mannings n)	0.1	Field Capacity (volumen fraction)	0.12	Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	0.5	Offset Height (in or mm)	6
Surface Slope (percent)	0	Wilting Point (volumen fraction)	0.03	Clogging Factor	0		
		Conductivity (in/hr or mm/hr)	50				
		Conductivity Slope	45				
		Suction Head (in or mm)	50				

Jardines de lluvia

Los datos de entrada necesarios para integrar los jardines de lluvia fueron obtenidos de (EPASWMM5, 2016). Los parámetros finales se fijaron mediante la literatura, las características de la zona de estudio y las recomendaciones del manual de la EPA. Se colocaron 9 unidades jardines de lluvia en cada subcuenca a excepción de la subcuenca 23 donde se colocaron solo 8. Dando un total de 206 jardines de lluvia,

esto se consideró debido a que se extrajo información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía SCINCE, sistema para la consulta de información censal 2010 versión 05/2012, en la cual se encuentra datos que muestran que hay un total de 206 viviendas dentro de la zona de estudio con clave AGEB 4473, por lo que se le asignó un jardín de lluvia a cada vivienda con medidas de 3x3 m dándonos un área de 9 m² por cada vivienda.

Tabla 10 Parámetros de entrada en SWMM para Jardines de Lluvia

Surface		Soil	
Berm Height (in or mm)	150	Thickness (in or mm)	500
Vegetation Volume Fraction	0.1	Porosity (volumen fraction)	0.3
Surface Roughness (Mannings n)	0.12	Field Capacity (volumen fraction)	0.2
Surface Slope (percent)	0.3	Wilting Point (volumen fraction)	0.1
		Conductivity (in/hr or mm/hr)	10
		Conductivity Slope	1
		Suction Head (in or mm)	5

Techos verdes

Los datos de entrada necesarios para integrar los techos verdes fueron obtenidos de (Arjenaki, M. O., et al., 2021). Los parámetros finales se fijaron mediante la literatura, las características de la zona de estudio y las recomendaciones del manual de la EPA. Se colocaron 9 unidades techos en cada subcuenca a excepción de la subcuenca 23 donde se colocaron solo 8. Dando un total de 206 techos verdes, esto se consideró debido a que se extrajo información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía SCINCE, sistema para la consulta de información censal 2010 versión 05/2012, en la cual se encuentra datos que muestran que hay un total de 206 viviendas dentro de la zona de estudio con clave AGEB 4473, por lo que se le asignó un techo verde a cada vivienda con medidas de 6x12 m dándonos un área de 72 m² por cada vivienda.

Tabla 11 Parámetros de entrada en SWMM para Techos verdes

Surface		Soil		Drainage Mat	
Berm Height (in or mm)	50	Thickness (in or mm)	150	Thickness (in or mm)	50
Vegetation Volume Fraction	0.2	Porosity (volumen fraction)	0.5	Void Fraction	0.5
Surface Roughness (Mannings n)	0.13	Field Capacity (volumen fraction)	0.3	Roughness (Mannings n)	0.1
Surface Slope (percent)	0	Wilting Point (volumen fraction)	0.1		
		Conductivity (in/hr or mm/hr)	50		
		Conductivity Slope	30		
		Suction Head (in or mm)	50		

Zanjas de infiltración

Los datos de entrada necesarios para integrar las zanjas de infiltración fueron obtenidos de (Song, J. Y., & Chung, E. S., 2017). Los parámetros finales se fijaron mediante la literatura, las características de la zona de estudio y las recomendaciones del manual de la EPA. Se colocaron 2 unidades de zanjas de infiltración en cada subcuenca, considerando una a cada extremo de la vialidad, con un ancho de 1 m y la longitud acorde a la longitud total de las vialidades dentro de cada subcuenca.

Tabla 12 Parámetros de entrada en SWMM para Zanjas de infiltración

Surface		Storage		Underdrain	
Berm Height (in or mm)	150	Thickness (in or mm)	750	Flow Coefficient	0
Vegetation Volume Fraction	0.0	Void Ratio (Voids / Solids)	0.4	Flow Exponent	0.5
Surface Roughness (Mannings n)	0.013	Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	210	Offset Height (in or mm)	0
Surface Slope (percent)	5	Clogging Factor	0		

Pavimentos permeables

Los datos de entrada necesarios para integrar el pavimento permeable fueron obtenidos de (Song, J. Y., & Chung, E. S., 2017) y (Arjenaki, M. O., et al., 2021). Los parámetros finales se fijaron mediante la literatura, las características de la zona de estudio y las recomendaciones del manual de la EPA. Se colocó 1 unidad de pavimento permeable en cada subcuenca, considerando un ancho de 9 m de la vialidad, el area varia dentro de cada subcuenca debido a que depende de la longitud de cada vialidad la cual se calculó automáticamente en SWMM, pero el total aproximado de longitud de todas las vialidades dentro de la zona de estudio es de 2,447 m, dándonos como resultado un total de 22,023 m² de pavimento permeable en toda la cuenca.

Tabla 13 Parámetros de entrada en SWMM para Pavimentos permeables

Surface		Pavement		Storage		Underdrain	
Berm Height (in or mm)	25	Thickness (in or mm)	60	Thickness (in or mm)	250	Flow Coefficient	0.69
Vegetation Volume Fraction	0.0	Void Ratio (Voids / Solids)	0.13	Void Ratio (Voids / Solids)	0.43	Flow Exponent	0.5
Surface Roughness (Mannings n)	0.12	Impervious Surface Fraction	0	Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	600	Offset Height (in or mm)	6
Surface Slope (percent)	1.0	Permeability (in/h or mm/h)	200	Clogging Factor	0		
		Clogging Factor	0				

Barriles de lluvia

Los datos de entrada necesarios para integrar los barriles de lluvia fueron obtenidos de (Arjenaki, M. O., et al., 2021) y (Bai, Y., et al., 2018). Los parámetros finales se fijaron mediante la literatura, las características de la zona de estudio y las recomendaciones del manual de la EPA. Se colocaron 9 unidades de barriles de lluvia en cada subcuenca a excepción de la subcuenca 23 donde se colocaron solo 8. Dando un total de 206 barriles de lluvia, esto se consideró debido a que se extrajo

información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía SCINCE, sistema para la consulta de información censal 2010 versión 05/2012, en la cual se encuentra datos que muestran que hay un total de 206 viviendas dentro de la zona de estudio con clave AGEB 4473, por lo que se le asignó un barril de lluvia a cada vivienda con una capacidad de 50 galones.

Tabla 14 Parámetros de entrada en SWMM para Barriles de Lluvia

Storage		Underdrain	
Barrel Height / (in or mm)	914	Flow Coefficient	0.68
		Flow Exponent	0.5
		Offset Height (in or mm)	125
		Drain Delay (hours)	6

Cunetas verdes

Los datos de entrada necesarios para integrar las cunetas verdes fueron obtenidos de (Song, J. Y., & Chung, E. S., 2017). Los parámetros finales se fijaron mediante la literatura, las características de la zona de estudio y las recomendaciones del manual de la EPA. Se colocó 1 unidad de cuneta verde en cada subcuena, considerando un extremo de la vialidad, con un ancho de 2 m y la longitud acorde a la longitud total de las vialidades dentro de cada subcuena.

Tabla 15 Parámetros de entrada en SWMM para Cunetas verdes

Surface	
Berm Height (in or mm)	600
Vegetation Volume Fraction	0.0
Surface Roughness (Mannings n)	0.1
Surface Slope (percent)	1.0
Swale Side Slope / (run / rise)	3

La siguiente tabla muestra los porcentajes que abarcan cada uno de los diferentes SuDS asignados a las 23 subcuenas de la zona de estudio con respecto al área total de cada subcuena:

Tabla 16 Porcentaje de áreas cubiertas de la subcuenca seleccionada

Subcuenca	SuDS						
	Celdas de biorretención	Jardines de lluvia	Techos verdes	Zanjas de infiltración	Pavimento permeable	Barriles de lluvia	Cunetas verdes
S-1	10.000	1.246	9.969	4.308	14.700	0.040	4.308
S-2	9.756	1.976	15.800	6.829	23.300	0.064	6.341
S-3	9.375	3.375	27.000	5.000	39.900	0.109	5.000
S-4	9.804	1.588	12.700	4.706	18.800	0.052	4.510
S-5	9.767	1.884	15.100	3.488	22.300	0.061	3.256
S-6	9.545	1.841	14.700	4.091	21.800	0.060	4.318
S-7	9.767	1.884	15.100	4.651	22.300	0.061	4.651
S-8	9.796	1.500	12.000	4.074	17.700	0.049	4.074
S-9	9.565	1.761	14.100	2.609	20.800	0.057	2.609
S-10	9.444	3.000	24.000	3.704	35.400	0.097	4.074
S-11	9.474	2.132	17.100	4.211	25.200	0.069	4.211
S-12	9.524	1.929	15.400	4.286	22.800	0.063	4.286
S-13	10.500	1.473	11.800	4.364	17.400	0.048	4.545
S-14	10.100	1.306	10.500	4.516	15.400	0.042	4.516
S-15	10.000	1.761	14.100	7.826	20.800	0.057	7.391
S-16	10.200	1.558	12.500	5.000	18.400	0.051	5.192
S-17	10.500	2.613	20.900	8.387	30.900	0.085	8.387
S-18	9.000	3.240	25.900	7.200	38.300	0.105	7.200
S-19	9.756	1.976	15.800	5.610	23.300	0.064	5.366
S-20	10.800	2.189	17.500	4.865	25.900	0.071	5.135
S-21	10.200	1.328	10.600	2.623	15.700	0.043	2.787
S-22	9.800	1.800	14.400	3.778	21.300	0.058	3.778
S-23	10.100	1.161	9.290	3.226	15.400	0.038	3.226

Resultados y Discusión

Etapa 1

En la siguiente tabla se muestra una recopilación de estudios que se han llevado a cabo en diversas partes del mundo que han presentado desafíos o barreras en la integración de los SuDS en zonas altamente urbanizadas, y como han tomado acciones de mitigación para superar estas barreras mediante instrumentos como guías y manuales, programas, legislaciones y tecnologías digitales y de comunicación, obteniendo resultados positivos.

Tabla 17 Ejemplos de estudios que han abordado los desafíos de integración de los SuDS

Desafío	Caso de estudio	País	Acciones de mitigación	Instrumento	Resultados
Financiamiento	Ossa-Moreno, J., et al., (2017)	Inglaterra	División de costos de financiamiento y mantenimiento entre las partes interesadas	Guía	Obtención de fondos y promoción de la integración de los SuDS
Vías regulatorias	Andrés-Doménech, I., et al, (2021).	España	Adopción de SuDS en nuevos polígonos industriales y desarrollos urbanos	Leyes	Reducción de la vulnerabilidad ante inundaciones
Estándares de diseño	McClymont, K., et al, (2020)	Brasil	Modelo de integración de los cuatro pilares del diseño de los SuDS basándose en el Manual de SuDS del Reino Unido	Manual	Se demostró una compensación entre el costo y los valores de resiliencia
Factores socioeconómicos	Cotterill, S., & Bracken, L. J. (2020)	Inglaterra	Licitaciones para propuestas de monitoreo de aguas superficiales y actividades de divulgación	Tecnologías digitales y de comunicación	Impulsar la adopción, concienciación y educación de la comunidad respecto a los SuDS

Etapa 2

Analizando la información obtenida durante la recopilación bibliográfica, se seleccionaron investigaciones de simulación y modelación de sistemas de drenaje pluvial, para elaborar una tabla que contenga información acerca de las principales herramientas que se utilizan en la simulación de sistemas de drenaje pluvial en zonas urbanas en los últimos años. Entre las variables y parámetros seleccionados para la comparación de las herramientas y su aplicabilidad de acuerdo a una zona de estudio, se tomaron en cuenta datos como superficie urbana, impermeabilidad y condiciones climatológicas.

Tabla 18 Aplicabilidad de las herramientas de simulación

Fuente	Software	Lugar	Caso de estudio
Artina, S, et al., (2007)	InfoWorks, MIKE URBAN (MOUSE)	Bologna, Italy	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 1.15 ha • Área impermeable • Clima continental
Peng, H. Q., et al., (2015)	InfoWorks	Yangpu, Shanghai, China	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 97 ha • Área impermeable • Clima húmedo subtropical
Chang, T. J., et al., (2015)	SWMM	New Taipéi, Taiwán	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 277 ha • Área impermeable • Clima húmedo subtropical
Jato-Espino, D., et al., (2016)	SWMM	Donostia, Spain	<ul style="list-style-type: none"> • Área impermeable • Abundantes lluvias • Clima oceánico
Leitão, J. P., et al., (2017)	InfoWorks, SWMM	Coimbra, Portugal	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 150 ha • Área impermeable • Clima mediterráneo cálido de verano
Martins, R., et al., (2018)	SWMM	Keighley, Bradford, UK	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 18 ha • Clima oceánico • Área impermeable
Löwe, R., et al., (2017)	MIKE URBAN (MOUSE)	Melbourne, Australia	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 300 ha • Área impermeable • Clima oceánico
Yang, Q., et al., (2018)	SWMM	Nanjing, China	<ul style="list-style-type: none"> • Área impermeable • Clima húmedo subtropical
Nile, B. K. (2018)	ASSA	Karbala, Irak	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 360 ha • Área impermeable • Zona semiárida

Bermúdez, M., et al., (2018)	InfoWorks	Gante, Belgium	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 275 ha • Área impermeable • Clima oceánico • Abundantes lluvias
Ocampo, C., et al., (2019)	SWMM	Santiago de Cali, Colombia	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 2,488 ha • Área impermeable • Clima de sabana tropical
Andimuthu, R., et al., (2019)	SWMM	Chennai, India	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 697.1 ha • Área impermeable • Clima tropical húmedo-seco
Yang, Y., et al., (2020)	SWMM	Shanghái, China	<ul style="list-style-type: none"> • Área de 320 ha • Área impermeable • Clima húmedo subtropical

Dada la importancia que han tomado las herramientas digitales como programas de simulación y/o modelación, se propuso elaborar una segunda tabla, donde se compararon los elementos de los programas y herramientas de simulación de sistemas pluviales, como sus características, módulos y su accesibilidad. Con esto se pretende mostrar sus capacidades para la elección de una herramienta digital que mejor se adapte a las características particulares del sitio de estudio y del proyecto.

Tabla 19 Capacidades de los programas de simulación y modelado

Programa	Características	Módulos	Accesibilidad
InfoWorks	<ul style="list-style-type: none"> • Modelado de redes de tuberías presurizadas y bombas comportamiento. • Operación de control en tiempo real de estructuras móviles. • Evaluaciones de control de contaminación. • Estructuras LID, BMP o SUD representadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hidrología clásica ✓ Hidrología 2D ✓ Hidráulica fluvial ✓ Hidráulica de redes ✓ Calidad de agua ✓ Control en tiempo real de estructuras 	Costo asociado
MIKE URBAN (MOUSE)	<ul style="list-style-type: none"> • Creación y gestión de modelos basados en SIG • Calidad del agua, flujo de fuego, control en tiempo real y simulación de golpe de ariete integrados • Transporte de sedimentos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lluvia-escorrentía ✓ Flujo en tubería ✓ Estructuras de control ✓ Transporte de sedimentos ✓ Procesos biológicos 	Costo asociado

	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de sistemas de recolección • Gestión de escenarios 		
SWMM	<ul style="list-style-type: none"> • Modelado hidráulico. • Contabilización de procesos hidrológicos. • Estimación de la carga contaminante. • Herramienta complementaria para proyecciones climáticas. • Infraestructura verde como controles LID. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Escorrentía superficial ✓ Infiltración ✓ Aguas subterráneas ✓ Deshielo de nieves ✓ Comportamiento hidráulico del sistema ✓ Inundaciones en la superficie del terreno ✓ Comportamiento y evolución de la calidad del agua 	Gratuito
Autodesk Storm and Sanitary Analysis (ASSA)	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de componentes del sistema de drenaje. • Mapeo de llanuras aluviales de sistemas de canales naturales. • Diseño de estrategias de control. • Generación de cargas contaminantes. • Evaluación de la efectividad de las BMP. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modelado de hidrología ✓ Modelado hidráulico ✓ Modelado de calidad del agua ✓ Modelado de alcantarillado sanitario 	Costo asociado

Se encontraron 4 softwares principales en la literatura recopilada, donde la mayoría de los casos utilizaron el SWMM, debido a que, además de ser un software de código abierto y de uso gratuito, maneja redes de tamaño ilimitado y es de fácil acceso.

Posteriormente, después de un análisis y comparación de los softwares, se optó por elegir el SWMM como la mejor herramienta para la modelación y simulación del sistema pluvial de la colonia “El Vidrio”, debido a su accesibilidad, sus capacidades y que en sus módulos cuenta con la opción de integrar técnicas de SuDS como alternativa de solución a la problemática presentada.

Para la elección de los SuDS más adecuados para el caso de estudio propuesto, se consideró lo siguiente:

Debido a que el caso de estudio se encuentra en una zona árida donde la mayor parte del año se presentan temperaturas cálidas que llegan hasta los 50°C, los techos verdes no son una opción viable debido a los altos costos de instalación y de mantenimiento que presentarían.

Otra condicionante para el caso de estudio es que la zona presenta un tipo de suelo arcilloso, lo cual impide la infiltración del agua al subsuelo, por lo que los sumideros, las zanjas de filtro, los pavimentos permeables

Las franjas de filtro, a pesar de ser una buena opción para áreas impermeables y un bajo costo de instalación, para este caso de estudio no es posible debido a que es una zona altamente urbanizada sin disponibilidad de espacio, lo mismo sucede con las cuencas de infiltración, cuencas de detención, estanques y humedales.

Las cunetas verdes son una opción viable debido que son aptas para terrenos con pendientes suaves, la cobertura vegetal requiere de días soleados, reducen y retrasan la escorrentía y su costo de instalación es bajo. Se deben considerar otros factores como la calidad de agua y mantenimiento.

Las áreas de biorretención son adecuadas para áreas urbanas impermeables debido a su facilidad para adaptarse al paisaje, además tare consigo beneficios como mejoramiento de la calidad del agua y una mejor estética. Es importante considerar su mantenimiento en cuanto a la jardinería.

Es necesario considerar en el análisis la cantidad de espacio disponible, el volumen de reducción y la localización de puntos estratégicos que maximicen el potencial de estas técnicas.

Etapa 3

Este estudio se realizó en el área urbana de la Colonia “El Vidrio” ubicada en la ciudad de Mexicali, B.C. Se empleó el software SWMM para simular el proceso lluvia-escorrentía. El caso de estudio con un área superficial total de 10.35 ha se dividió en 23 subcuencas y se diseñó un sistema de alcantarillado pluvial tradicional debido a que la zona no cuenta con drenaje pluvial, se simuló un evento de lluvia con duración de 1 hora y se consideraron períodos de retorno de lluvia de 10, 25 y 50 años. A continuación, se han aplicado 7 técnicas de SuDS; celdas de biorretención, jardines de lluvia, techos verdes, zanjas de infiltración, pavimento permeable, barriles de lluvia y cunetas verdes en las 23 subcuencas ubicadas dentro de la zona de estudio. En total, se realizaron 24 simulaciones bajo diferentes escenarios; un escenario con solo un drenaje pluvial tradicional y otros 7 escenarios combinando el drenaje tradicional con un SuDS: celdas de biorretención, jardines de lluvia, techos verdes, zanjas de infiltración, pavimento permeable, barriles de lluvia y cunetas verdes. Estos 8 escenarios se simularon considerando los 3 períodos de retorno (10, 25 y 50 años). Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 20 Valores finales obtenidos de la simulación con un TR10

Periodo de retorno de 10 años			
Método	Escorrentía Máxima LPS	Flujo Máximo LPS	
		Salida 1	Salida 2
Drenaje tradicional	59.69	366.01	298.36
Celdas de biorretención	55.39	363.97	277.88
Jardines de lluvia	59.21	365.67	294.80
Techos verdes	55.74	363.03	267.41
Zanjas de infiltración	58.35	364.50	288.91
Pavimento permeable	52.99	361.47	250.85
Barriles de lluvia	59.67	366.00	298.26
Cunetas verdes	59.30	365.84	296.39

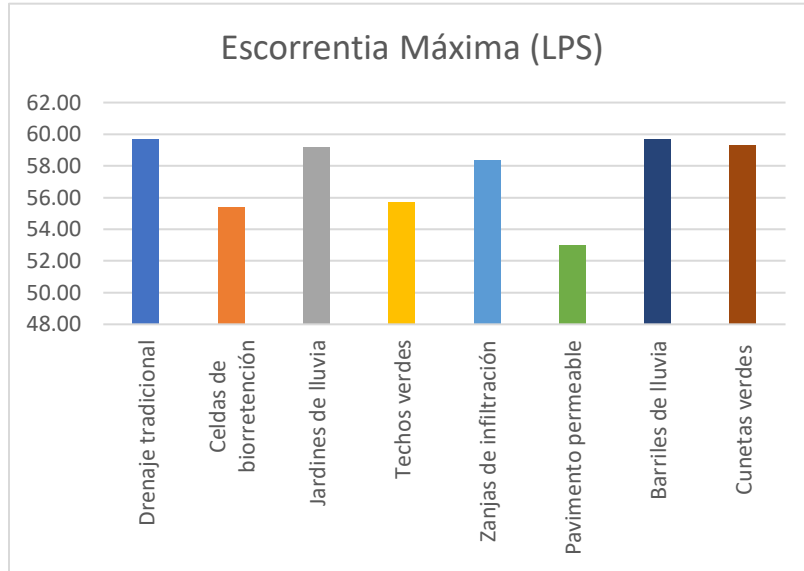


Figura 7 Escorrentía máxima en LPS de la simulación con un TR10

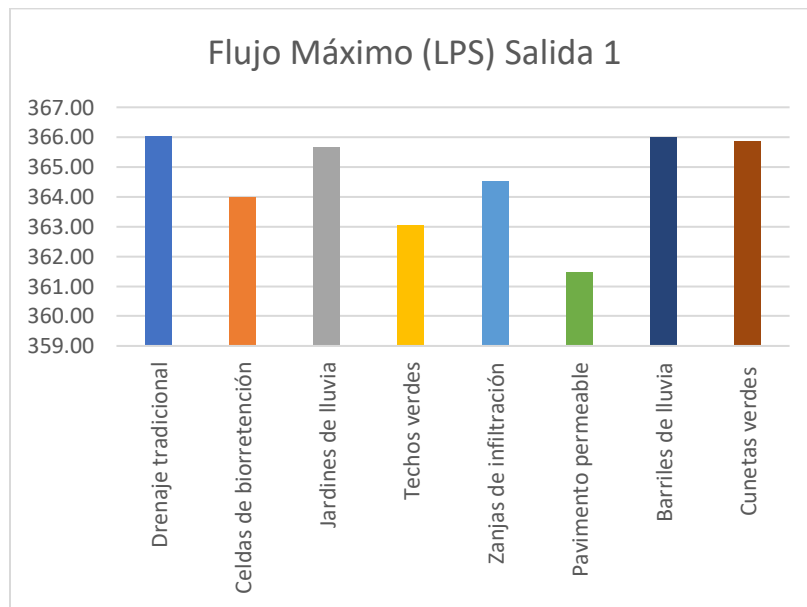


Figura 8 Flujo máximo en LPS en la salida 1 con un TR10

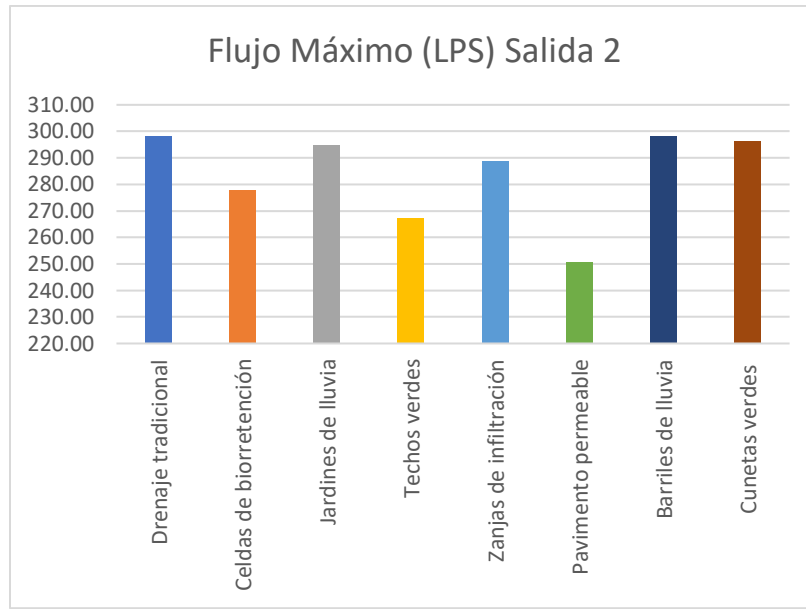


Figura 9 Flujo máximo en LPS en la salida 2 con un TR10

Tabla 21 Valores finales obtenidos de la simulación con un TR25

Periodo de retorno de 25 años			
Método	Escorrentía Máxima LPS	Flujo Máximo LPS	
		Salida 1	Salida 2
Drenaje tradicional	80.07	379.33	335.94
Celdas de biorretención	73.96	376.58	330.77
Jardines de lluvia	79.39	378.86	335.08
Techos verdes	74.45	375.41	327.70
Zanjas de infiltración	78.16	377.21	333.92
Pavimento permeable	70.75	373.50	321.52
Barriles de lluvia	80.05	379.32	335.91
Cunetas verdes	79.44	378.88	335.60

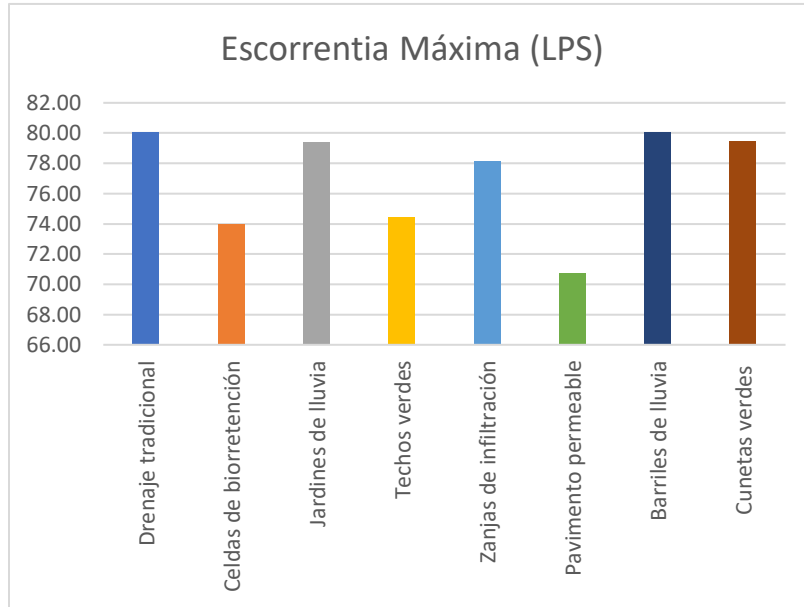


Figura 10 Escorrentía máxima en LPS de la simulación con un TR25

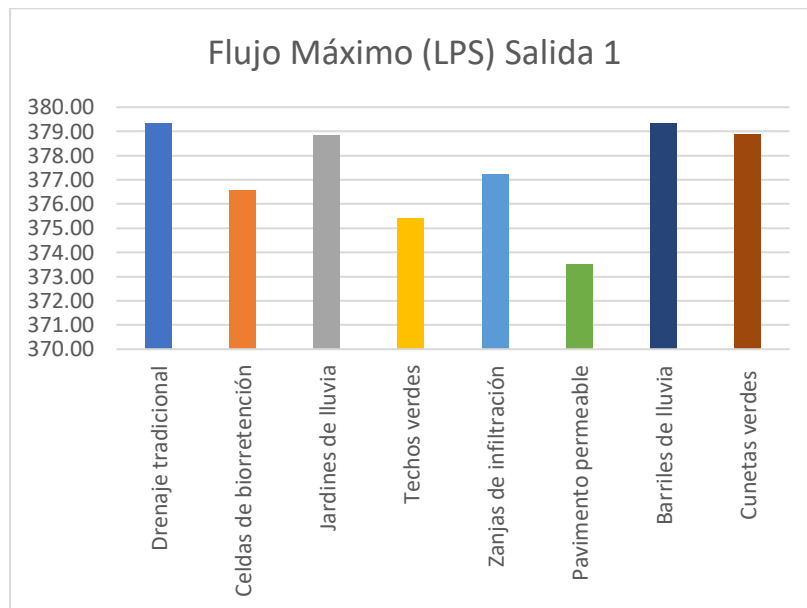


Figura 11 Flujo máximo en LPS en la salida 1 con un TR25

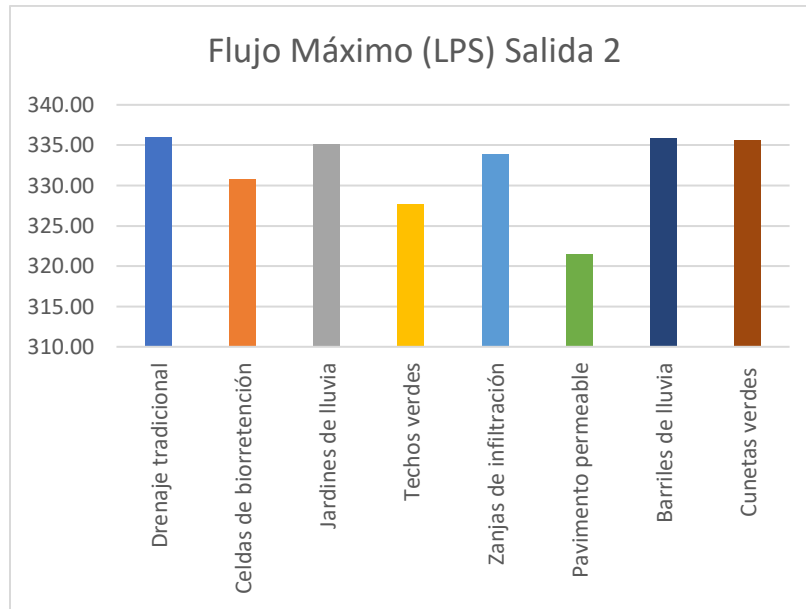


Figura 12 Flujo máximo en LPS en la salida 2 con un TR25

Tabla 22 Valores finales obtenidos de la simulación con un TR50

Periodo de retorno de 50 años			
Método	Escorrentía Máxima LPS	Flujo Máximo LPS	
		Salida 1	Salida 2
Drenaje tradicional	95.71	389.55	340.92
Celdas de biorretención	88.18	386.02	340.22
Jardines de lluvia	94.86	388.95	340.90
Techos verdes	88.79	384.51	339.96
Zanjas de infiltración	93.34	386.83	341.09
Pavimento permeable	84.29	382.14	336.88
Barriles de lluvia	95.68	389.52	340.94
Cunetas verdes	94.83	388.84	341.20

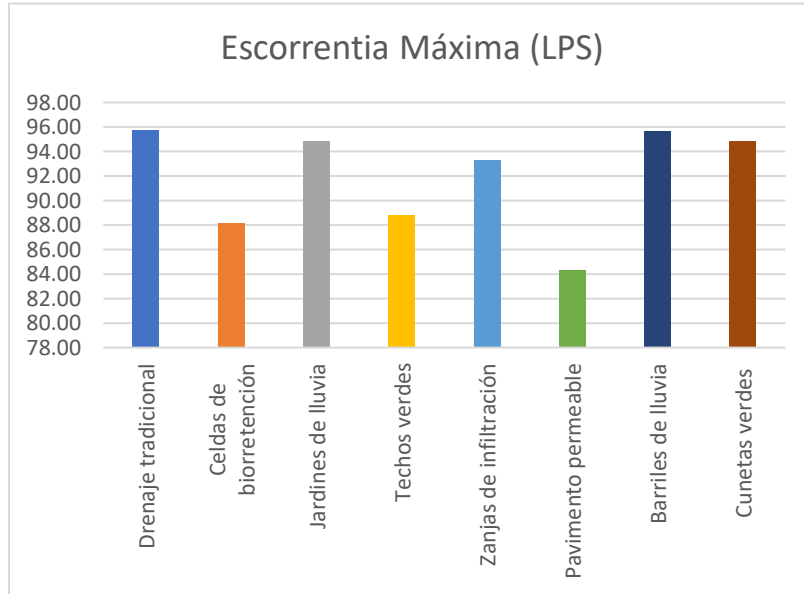


Figura 13 Escorrentía máxima en LPS de la simulación con un TR50

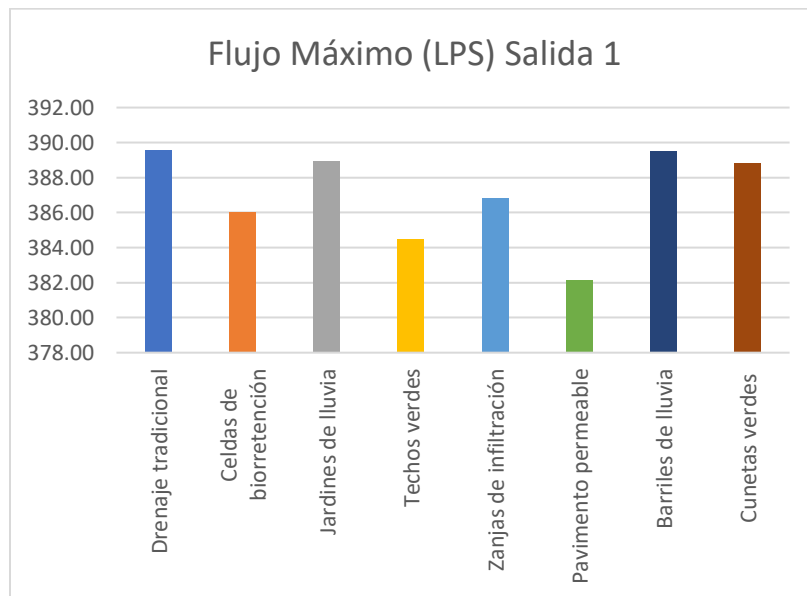


Figura 14 Flujo máximo en LPS en la salida 1 con un TR50

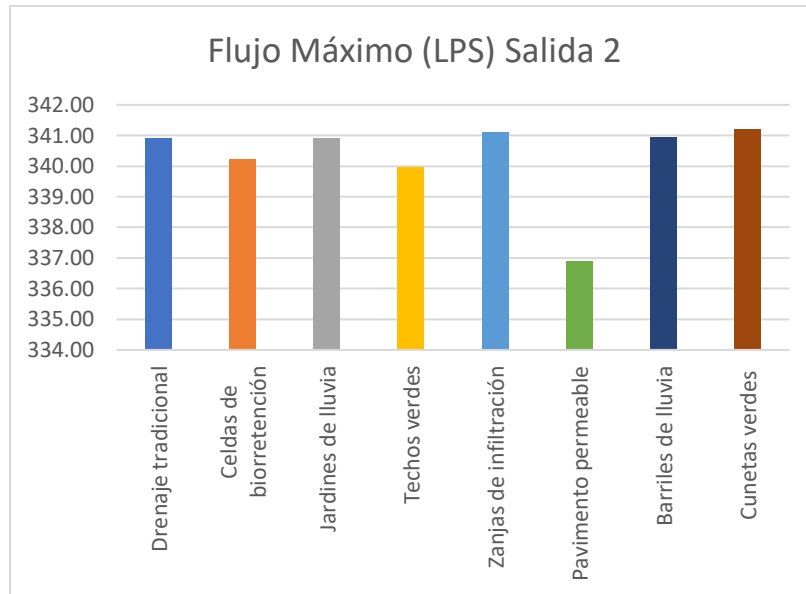


Figura 15 Flujo máximo en LPS en la salida 2 con un TR50

En la Tabla 21 se puede observar que los SuDS implementados que mostraron mejores resultados en la reducción de escorrentía máxima para el caso de estudio “Colonia El Vidrio” fueron el pavimento permeable, las celdas de biorretención y los techos verdes con un porcentaje de disminución aproximado de hasta 11.93 %, 7.87% y 7.23% respectivamente, seguido por las zanjas de infiltración con un 2.48% de reducción de la escorrentía máxima. Los jardines de lluvia, barriles de lluvia y cunetas verdes no lograron alcanzar el 1% en la reducción de la escorrentía máxima.

Tabla 23 Porcentaje de reducción de escorrentía máx. por cada SuDS

	% de disminución de Escorrentía Max.		
	TR10	TR25	TR50
Celdas de biorretención	7.20	7.63	7.87
Jardines de lluvia	0.80	0.85	0.89
Techos verdes	6.62	7.02	7.23
Zanjas de infiltración	2.24	2.39	2.48
Pavimento permeable	11.22	11.64	11.93
Barriles de lluvia	0.03	0.02	0.03
Cunetas verdes	0.65	0.79	0.92

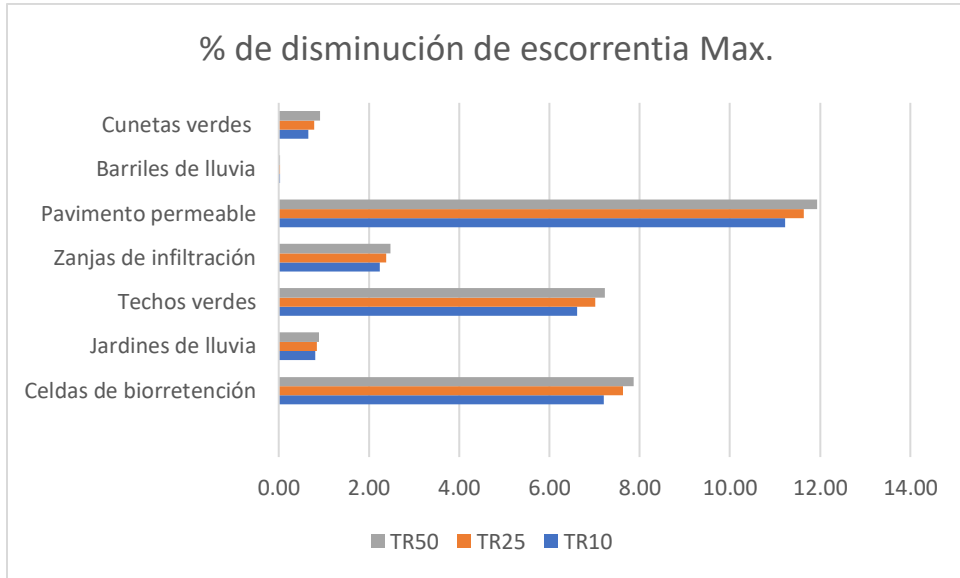


Figura 16 Grafico de reducción de escorrentía máx. por cada SuDS

Conclusiones y recomendación

Conclusiones teóricas

En esta investigación se presentan los cinco desafíos principales para la integración de los SuDS en ciudades de todo el mundo: financiamiento, vías regulatorias, estándares de diseño, factores socioeconómicos e innovación.

Financiamiento

El desafío de financiamiento es probablemente la barrera frecuente en todos los países al momento de intentar integrar SuDS en zonas urbanas, en especial en los países en desarrollo. Sin embargo, después de un análisis de la literatura disponible, la mejor opción para superar este desafío es promoviendo la inversión privada, y para lograr esto es necesario vender los proyectos de SuDS de una forma más atractiva, buscando la forma de monetizar todos los beneficios que ofrecen para lograr equilibrarlo con la inversión inicial y el mantenimiento. Reconocemos que el contabilizar con exactitud y precisión los diversos beneficios que los diferentes SuDS conllevan representa un obstáculo al no contar con metodologías completas que integren todos estos aspectos.

Vías regulatorias

Para que las ciudades de todo el mundo comiencen a transitar hacia una planeación urbana sustentable y sean más resilientes, sin duda alguna es primordial que las legislaciones y normativas se actualicen e incluyan la integración de los SuDS de forma obligatoria, desde nivel nacional hasta a nivel local. Se requiere además de la creación de organismos que vigilen su cumplimiento y sancionen mediante multas a quienes incumplan con la ley. Es necesario que los polígonos industriales y los futuros diseños de desarrollos urbanos incluyan este nuevo concepto de resiliencia.

Estándares de diseño

En algunas partes del mundo ya se está superando el desafío de estándares de diseño, mediante instrumentos como guías y manuales, lo que ha servido de apoyo para ciudades de otros países que no cuentan con este tipo de herramientas. Sin

embargo, es necesario adaptar este tipo de instrumentos de diseño a las diferentes características de cada sitio en particular, considerando factores como vegetación nativa, condiciones climatológicas, tipo de suelo, etc. Este estudio reconoce que la poca experiencia y conocimientos de los profesionales en el área con respecto al diseño y la integración de los SuDS representa un obstáculo, por lo que también es necesario adaptar los planes de estudio y brindar capacitación del personal junto con las medidas anteriormente propuestas.

Factores socioeconómicos

Todas las comunidades sin importar su nivel socioeconómico deben tener derecho a disfrutar de los beneficios que ofrecen los SuDS. Realizar estudios y entrevistas que consideren la opinión de las comunidades más vulnerables a inundaciones es la primera línea de acción que se debe tomar, de nada sirve instalar un SuDS si las personas no tienen conocimientos básicos de sus funciones, características y mantenimiento. Difundir información y crear programas donde los habitantes locales participen en actividades relacionadas con la gestión de inundaciones es una medida que debe ser incluida en el proceso de planeación urbana. E

Innovación

Por último, consideramos que el desafío de la innovación es probablemente la barrera más complicada de superar en los países en desarrollo. Los proyectos pilotos en países de primer mundo son necesarios para que los países en desarrollo puedan estudiar y analizar los casos de éxito, ya que única forma de superar este obstáculo es mediante un intercambio de conocimientos entre casos de estudio que presenten características similares, para poco a poco perfeccionar las metodologías.

Para abordar exitosamente todos los desafíos anteriormente expuestos es necesaria la colaboración entre planificadores urbanos, comunidades, instituciones educativas, reguladores y operadores. Se espera que con este estudio se impulse la búsqueda de nuevas estrategias para integrar los SuDS en las ciudades ubicadas

en países en vías de desarrollo para minimizar los problemas de inundaciones y mejorar la resiliencia.

Conclusiones metodológicas

Se logró seleccionar la herramienta que más se adapta a una ciudad árida con las características fisiográficas de la ciudad Mexicali, Baja California. Principalmente las técnicas de SuDS deben ser tomadas en cuenta como una herramienta para reducir vulnerabilidad ante eventos de precipitación extrema. La eficiencia de estos métodos debe ser analizada utilizando softwares y modelos en puntos de alta vulnerabilidad de la ciudad, antes de su aplicación.

Identificar que SuDS son más aplicables antes de realizar un modelo de simulación reduciría tiempos y costos, buscando no solo solucionar la problemática de una zona que presente vulnerabilidad ante inundaciones, si no también maximizando la eficiencia de estas técnicas, facilitando, además, a los tomadores de decisiones, planeadores urbanos y agencias gubernamentales la aplicación de estas técnicas en la infraestructura pública.

Conclusiones físicas

Se realizaron 24 simulaciones, implementando un drenaje pluvial tradicional y complementándolo con 7 SuDS: celdas de biorretención, jardines de lluvia, techos verdes, zanjas de infiltración, pavimento permeable, barriles de lluvia y cunetas verdes. Estos 8 escenarios se simularon considerando los 3 periodos de retorno (10, 25 y 50 años). Los resultados finales mostraron que los 3 SuDS más efectivos para la zona de estudio "Colonia El Vidrio" el pavimento permeable, las celdas de biorretención y los techos verdes con un porcentaje de disminución aproximado de hasta 11.93 %, 7.87% y 7.23% respectivamente. Se requieren de estudios adicionales para determinar la factibilidad de colocar alguno de estos tipos de SuDS en el área de estudio, considerando aspectos socio-económicos, disponibilidad de espacio, reglamentos urbanos, etc.

Las zanjas de infiltración, jardines de lluvia, barriles de lluvia y cunetas verdes no mostraron ser eficaces para la zona de estudio, sin embargo, este estudio no

descarta la posibilidad de una mala calidad de datos obtenida, debido a la inexistente información, la falta de manuales de diseños técnicos o la incompatibilidad de estos SuDS con las características de la zona de estudio. Es necesario, además, indagar más sobre posibles parámetros sensibles que puedan afectar el desempeño de estas técnicas.

La investigación futura puede abordar varias extensiones y mejoras. Este proyecto reconoce que el modelo SWMM para el caso de estudio “Colonia El Vidrio” puede mejorarse mediante calibración y validación si se contara con una mejor disponibilidad y calidad de datos, aunque el desempeño del modelo después de agregar SuDS no puede calibrarse, la efectividad real de los resultados de los escenarios propuestos debe evaluarse mediante el monitoreo de campo posterior a la instalación. La investigación futura también puede abordar varias extensiones y mejoras

Anexos

A.2 Características del suelo

Textura del suelo	K	Ψ	ϕ	FC	WP
Arena	4.74	1.93	0.437	0.062	0.024
Arena arcillosa	1.18	2.40	0.437	0.105	0.047
Franco arenosa	0.43	4.33	0.453	0.190	0.085
Franco	0.13	3.50	0.463	0.232	0.116
Franco limoso	0.26	6.69	0.501	0.284	0.135
Franco arcilloso arenoso	0.06	8.66	0.398	0.244	0.136
Franco arcilloso	0.04	8.27	0.464	0.310	0.187
Franco arcilloso limoso	0.04	10.63	0.471	0.342	0.210
Arcilla arenosa	0.02	9.45	0.430	0.321	0.221
Arcilla limosa	0.02	11.42	0.479	0.371	0.251
Arcilla	0.01	12.60	0.475	0.378	0.265

K = conductividad hidráulica saturada, in / hr.

Ψ = cabeza de succión, in.

Φ = porosidad, fracción

FC = capacidad de campo, fracción.

WP= punto de marchitez, fracción.

Fuente: Rawls, W.J. et al., (1983). J. Hyd. Engr., 109:1316

A.3 Definiciones de grupos de suelos hidrológicos del NRCS

Grupo	Significado	Conductividad hidráulica saturada (in/hr)
A	<p>Bajo potencial de escorrentía.</p> <p>El agua se transmite libremente a través del suelo.</p> <p>Los suelos del Grupo A suelen tener menos del 10 por ciento de arcilla y más del 90 por ciento de arena o grava y tienen texturas de grava o arena.</p>	>1.42
B	<p>Potencial de escorrentía moderadamente bajo.</p> <p>La transmisión del agua a través del suelo no se ve obstaculizada. Los suelos del grupo B suelen tener entre un 10 y un 20 por ciento de arcilla y entre un 50 y un 90 por ciento de arena y tienen texturas franco-arenosas o franco-arenosas</p>	0.57 – 1.42
C	<p>Potencial de escorrentía moderadamente alto</p> <p>La transmisión de agua a través del suelo está algo restringida. Los suelos del grupo C suelen tener entre un 20 y un 40 por ciento de arcilla y menos del 50 por ciento de arena y tienen texturas franco, franco limoso, franco arcilloso arenoso, franco arcilloso y franco arcilloso limoso.</p>	0.06 – 0.57
D	<p>Alto potencial de escorrentía.</p> <p>El movimiento del agua a través del suelo está restringido o muy restringido. Los suelos del grupo D suelen tener más del 40 por ciento de arcilla, menos del 50 por ciento de arena y texturas arcillosas.</p>	<0-0.6

Fuente: Manual Nacional de Ingeniería de Hidrología, Capítulo 7, Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Departamento de Agricultura de EE. UU., enero de 2009.

A.4 Números de curva SCS1

Descripción del uso de la tierra	Grupo de Suelos Hidrológicos			
	A	B	C	D
Tierra cultivada				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales o pastizales				
Condición pobre	68	79	86	89
Buen estado	39	61	74	80
Prado				
Buen estado	30	58	71	78
Madera o tierras forestales				
Soporte delgado, cubierta pobre, sin mantillo	45	66	77	83
Buena portada	25	55	70	77
Espacios abiertos, céspedes, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
Buen estado: cubierta de hierba puesta 75% o más del área	39	61	74	80
Estado aceptable: cubierto de hierba 50 – 75% del área	49	69	79	84
Áreas comerciales y de negocios (85% impermeable)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeable)	81	88	91	93
Residencial				
Tamaño de lote promedio (% impermeable)				
1/8 ac o menos (65)	77	85	90	92
1/4 ac (38)	61	75	83	87
	57	72	81	86

1/3 ac (30)	54	70	80	85
1/2 ac (25)	51	68	79	84
1 ac (20)				
Estacionamientos pavimentados, techos, entradas de vehículos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentos con bordillos y alcantarillas pluviales	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Suciedad	72	82	87	89

Fuente: SCS Urban Hydrology for Small Watersheds, 2nd Ed., (TR-55), junio de 1986.

A.5 Almacenamiento de la depresión

Superficies impermeables	0.05 – 0.10 in
Céspedes	0.10 – 0.20 in
Pastura	0.20 in
Basura forestal	0.30 in

Source: ASCE, (1992). Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems, New York, NY.

A.6 N de Manning – Flujo terrestre

Superficie	n
Asfalto liso	0.011
Hormigón liso	0.012
Revestimiento de hormigón ordinario	0.013
Buena madera	0.014
Ladrillo con mortero de cemento	0.014
Arcilla vitrificada	0.015
Hierro fundido	0.015
Tubos de metal corrugado	0.024
Superficie de escombros de cemento	0.024
Tierras en barbecho (sin residuos)	0.05
Suelos cultivados	
Cobertura de residuos < 20%	0.06
Cobertura de residuos > 20%	0.17
Rango (natural)	0.13
Césped	
Corto, pradera	0.15
Denso	0.24
Gramma	0.41
Bosque	
Maleza ligera	0.40
Maleza densa	0.80

Source: McCuen, R. et al. (1996), Hydrology, FHWA-SA96-067, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Referencias bibliográficas

Abdelrahman, Y. T., El Moustafa, A. M., & Elfawy, M. (2018). Simulating Flood Urban Drainage Networks through 1D/2D Model Analysis. *Journal of Water Management Modeling*.

Alhumaid, M., Ghumman, A. R., Haider, H., Al-Salamah, I. S., & Ghazaw, Y. M. (2018). Sustainability evaluation framework of urban stormwater drainage options for arid environments using hydraulic modeling and multicriteria decision-making. *Water*, 10(5), 581.

Andimuthu, R., Kandasamy, P., Mudgal, B. V., Jeganathan, A., Balu, A., & Sankar, G. (2019). Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian coastal city. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10.

Andrés-Doménech, I., Anta, J., Perales-Momparler, S., & Rodriguez-Hernandez, J. (2021). Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis. *Sustainability*, 13(5), 2791.

Andrés-Doménech, I., Perales-Momparler, S., Morales-Torres, A., & Escuder-Bueno, I. (2018). Hydrological performance of green roofs at building and city scales under Mediterranean conditions. *Sustainability*, 10(9), 3105.

Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R. Z., Heidarzadeh, H., & Mahabadi, N. A. (2021). Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City). *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(1), 1-16.

Artina, S., Bolognesi, A., Liserra, T., & Maglionico, M. (2007). Simulation of a storm sewer network in industrial area: Comparison between models calibrated through experimental data. *Environmental modelling & software*, 22(8), 1221-1228.

Avery, L. M. (2012). *Rural sustainable drainage systems (RSuDS)*. Environment Agency: Bristol, UK.

Barros Ramalho Alves, P., Alexandra Alves Rufino, I., Hermínio Cunha Feitosa, P., Djordjević, S., & Javadi, A. (2020). Land-Use and Legislation-Based Methodology for the Implementation of Sustainable Drainage Systems in the Semi-Arid Region of Brazil. *Sustainability*, 12(2), 661.

Bai, Y., Zhao, N., Zhang, R., & Zeng, X. (2018). Storm water management of low impact development in urban areas based on SWMM. *Water*, 11(1), 33.

Beck, M. B. (2005). Vulnerability of water quality in intensively developing urban watersheds. *Environmental Modelling & Software*, 20(4), 381-400.

Bell, V. A., Kay, A. L., Cole, S. J., Jones, R. G., Moore, R. J., & Reynard, N. S. (2012). How might climate change affect river flows across the Thames Basin? An area-wide analysis using the UKCP09 Regional Climate Model ensemble. *Journal of Hydrology*, 442, 89-104.

Benton-Short, L., Keeley, M., & Rowland, J. (2019). Green infrastructure, green space, and sustainable urbanism: Geography's important role. *Urban geography*, 40(3), 330-351.

Bermúdez, M., Ntegeka, V., Wolfs, V., & Willems, P. (2018). Development and comparison of two fast surrogate models for urban pluvial flood simulations. *Water Resources Management*, 32(8), 2801-2815.

Bernal, A. I. C., Suárez, J. E. B., & Delgado, C. D. (2016). Estimate of direct economic losses caused by floods. Application of flood-damage curves in developing countries. *Investigaciones Geográficas*, (65), 169.

Chang, T. J., Wang, C. H., & Chen, A. S. (2015). A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas. *Journal of Hydrology*, 524, 662-679.

Chapman, C., & Hall, J. W. (2021). The Influence of Built Form and Area on the Performance of Sustainable Drainage Systems (SuDS). *Future Cities and Environment*, 7(1).

Charlesworth, S. M., & Booth, C. A. (Eds.). (2016). *Sustainable surface water management: a handbook for SUDS*. John Wiley & Sons.

Charlesworth, S. M. (2010). A review of the adaptation and mitigation of global climate change using sustainable drainage in cities. *Journal of Water and Climate Change*, 1(3), 165-180.

Chen, W., Huang, G., & Zhang, H. (2017). Urban stormwater inundation simulation based on SWMM and diffusive overland-flow model. *Water science and technology*, 76(12), 3392-3403.

Chow, J. C., Watson, J. G., Green, M. C., Lowenthal, D. H., Bates, B., Oslund, W., & Torres, G. (2000). Cross-border transport and spatial variability of suspended particles in Mexicali and California's Imperial Valley. *Atmospheric environment*, 34(11), 1833-1843.

CIRIA. 2017. " B £ ST: Beneficios de la herramienta SuDS ". Consultado el 12 de diciembre de 2017. <http://www.susdrain.org/resources/best.html>

Cotterill, S., & Bracken, L. J. (2020). Assessing the Effectiveness of Sustainable Drainage Systems (SuDS): Interventions, Impacts and Challenges. *Water*, 12(11), 3160.

Cueto, O. G., Soto, N. S., Núñez, M. Q., Benítez, S. O., & Limón, N. V. (2013). Extreme temperature scenarios in Mexicali, Mexico under climate change conditions. *Atmósfera*, 26(4), 509-520.

Czubski, K., Kozak, J., & Kolecka, N. (2013). Accuracy of SRTM-X and ASTER elevation data and its influence on topographical and hydrological modeling: case study of the Pieniny Mts. in Poland. *International Journal of Geoinformatics*, 9(2).

Dai, Q., Han, D., Zhuo, L., Huang, J., Islam, T., & Srivastava, P. K. (2015). Impact of complexity of radar rainfall uncertainty model on flow simulation. *Atmospheric Research*, 161, 93-101.

de Macedo, M. B., do Lago, C. A. F., & Mendiando, E. M. (2019). Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: Potentials and challenges for water security in a subtropical catchment. *Science of the Total Environment*, 647, 923-931.

Dhakal, K. P., & Chevalier, L. R. (2017). Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. *Journal of environmental management*, 203, 171-181.

Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., ... & Le Roux, X. (2015). Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4), 243-248.

EPASWMM5 (2016) "LID Rain Garden Control en #SWMM5 e #InfoSWMM para InfoSWMM Sustain" <https://swmm5.org/2016/09/05/lid-rain-garden-control-in-swmm5-and-infoswmm-for-infoswmm-sustain/>

Feng, L., Huang, Y., & Chu, X. L. (2014). Inventory of urban water logging in recent years: "Invisible project" tests urban civilization. URL: http://news.xinhuanet.com/local/2014-05/12/c_11110652729.htm. accessed on July 04, 2019.

Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., & Dahe, Q. (Eds.). (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal*, 12(7), 525-542.

Forbes Staff (2017) "En México se pierden cada año 230 mdd por inundaciones" Forbes México, <https://www.forbes.com.mx/mexico-pierden-230-mdd-cada-ano-por-inundaciones>.

García Cueto, O. R., TEJEDA MARTÍNEZ, A. D. A. L. B. E. R. T. O., & Bojórquez Morales, G. (2009). Urbanization effects upon the air temperature in Mexicali, BC, México. *Atmósfera*, 22(4), 349-365.

Gogate, N. G., Kalbar, P. P., & Raval, P. M. (2017). Assessment of stormwater management options in urban contexts using Multiple Attribute Decision-Making. *Journal of cleaner production*, 142, 2046-2059.

Goncalves, M. L., Zischg, J., Rau, S., Sitzmann, M., Rauch, W., & Kleidorfer, M. (2018). Modeling the effects of introducing low impact development in a tropical city: A case study from Joinville, Brazil. *Sustainability*, 10(3), 728.

Henonin, J., Russo, B., Mark, O., & Gourbesville, P. (2013). Real-time urban flood forecasting and modelling—a state of the art. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 717-736.

Higgitt, D. (2015). Knowledge exchange session I: Overview of current research findings. Paper presented at Blue-Green Cities Workshop: Urban Water Resources and Flood Risk Management. Ningbo, China. June 15–18, 2015.

Huong, H. T. L., & Pathirana, A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 379-394.

Huber, W. C., Dickinson, R. E., Barnwell Jr, T. O., & Branch, A. (1988). Storm water management model; version 4. Environmental Protection Agency, United States.

Hunter, N. M., Bates, P. D., Neelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wright, N. G., ... & Mason, D. C. (2008, February). Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 161, No. 1, pp. 13-30). Thomas Telford Ltd.

Hutchins, M. G., McGrane, S. J., Miller, J. D., Hagen-Zanker, A., Kjeldsen, T. R., Dadson, S. J., & Rowland, C. S. (2017). Integrated modeling in urban hydrology: reviewing the role of monitoring technology in overcoming the issue of 'big data' requirements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(1), e1177.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía SCINCE, sistema para la consulta de información censal 2010 versión 05/2012
<http://gaia.inegi.org.mx/scince2/viewer.html>

Jato-Espino, D., Charlesworth, S. M., Bayon, J. R., & Warwick, F. (2016). Rainfall–runoff simulations to assess the potential of SuDS for mitigating flooding in highly urbanized catchments. *International journal of environmental research and public health*, 13(1), 149.

Jato-Espino, D., Sillanpää, N., Charlesworth, S. M., & Andrés-Doménech, I. (2016). Coupling GIS with stormwater modelling for the location prioritization and hydrological simulation of permeable pavements in urban catchments. *Water*, 8(10), 451.

Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. (2018). Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. *Environmental science & policy*, 80, 132-143.

Jiménez Ariza, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., & Díaz-Granados, M. (2019). A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability*, 11(8), 2312.

Joshi, P., Leitão, J. P., Maurer, M., & Bach, P. M. (2021). Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. *Water Research*, 191, 116780.

Kang, R. S., & Marston, R. A. (2006). Geomorphic effects of rural-to-urban land use conversion on three streams in the Central Redbed Plains of Oklahoma. *Geomorphology*, 79(3-4), 488-506.

Kremer, P., Z. Hamstead, D. Haase, T. McPhearson, N. Frantzeskaki, E. Andersson, N. Kabisch, et al. 2016. "Key Insights for the Future of Urban Ecosystem Services Research." *Ecology and Society* 21 (2): 29. doi:10.5751/ES-08445-210229.

Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28.

Kozak, D., Henderson, H., de Castro Mazarro, A., Rotbart, D., & Aradas, R. (2020). Blue-green infrastructure (BGI) in dense urban watersheds. The case of the Medrano stream basin (MSB) in Buenos Aires. *Sustainability*, 12(6), 2163.

Lashford, C., Rubinato, M., Cai, Y., Hou, J., Abolfathi, S., Coupe, S., ... & Tait, S. (2019). SuDS & sponge cities: a comparative analysis of the implementation of pluvial flood management in the UK and China. *Sustainability*, 11(1), 213.

Leitão, J. P., Simões, N. E., Pina, R. D., Ochoa-Rodriguez, S., Onof, C., & Sá Marques, A. (2017). Stochastic evaluation of the impact of sewer inlets' hydraulic capacity on urban pluvial flooding. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 31(8), 1907-1922.

Lennon, M., Scott, M., & O'Neill, E. (2014). Urban design and adapting to flood risk: the role of green infrastructure. *Journal of Urban Design*, 19(5), 745-758.

Lewis A. Rossman & Wayne C. Huber (2016) "Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality" EPA United States Environmental Protection Agency
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100P2NY.PDF?Dockey=P100P2NY.PDF>

Liao, K. H., Deng, S., & Tan, P. Y. (2017). Blue-green infrastructure: new frontier for sustainable urban stormwater management. In *Greening Cities* (pp. 203-226). Springer, Singapore.

Li, H., L. Ding, M. Ren, C. Li, and H. Wang. 2017. "Sponge City Construction in China: A Survey of the Challenges and Opportunities." *Water* 9 (9): 594. doi:10.3390/w9090594.

Li, L., Collins, A. M., Cheshmehzangi, A., & Chan, F. K. S. (2020). Identifying enablers and barriers to the implementation of the Green Infrastructure for urban flood management: A comparative analysis of the UK and China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 54, 126770.

Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G., & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering. *Norsk vann*, 162, 8.

Liu, C. Y., & Chui, T. F. M. (2017). Factors influencing stormwater mitigation in permeable pavement. *Water*, 9(12), 988.

Li, Z., Wu, L., Zhu, W., Hou, M., Yang, Y., & Zheng, J. (2014). A new method for urban storm flood inundation simulation with fine CD-TIN surface. *Water*, 6(5), 1151-1171

Loc, H. H., Duyen, P. M., Ballatore, T. J., Lan, N. H. M., & Gupta, A. D. (2017). Applicability of sustainable urban drainage systems: an evaluation by multi-criteria analysis. *Environment Systems and Decisions*, 37(3), 332-343.

Lopardo, R. A., & Seoane, R. S. (2000). Algunas reflexiones sobre crecidas e inundaciones. *Ingeniería del agua*, 7(1), 11-21.

Löwe, R., Urich, C., Domingo, N. S., Mark, O., Deletic, A., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2017). Assessment of urban pluvial flood risk and efficiency of adaptation options through simulations—A new generation of urban planning tools. *Journal of Hydrology*, 550, 355-367.

Lund, N. S. V., Borup, M., Madsen, H., Mark, O., Arnbjerg-Nielsen, K., & Mikkelsen, P. S. (2019). Integrated stormwater inflow control for sewers and green structures in urban landscapes. *Nature Sustainability*, 2(11), 1003-1010.

Martínez, C. O. (2015) "Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS: Infraestructura hidráulica urbana para el control y aprovechamiento del agua de lluvia." Undergraduate, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Martins, R., Leandro, J., & Djordjević, S. (2018). Influence of sewer network models on urban flood damage assessment based on coupled 1D/2D models. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S717-S728.

McClymont, K., Cunha, D. G. F., Maidment, C., Ashagre, B., Vasconcelos, A. F., de Macedo, M. B., ... & Imani, M. (2020). Towards urban resilience through Sustainable Drainage Systems: A multi-objective optimisation problem. *Journal of Environmental Management*, 275, 111173.

Melville-Shreeve, P., Cotterill, S., Grant, L., Arahuetes, A., Stovin, V., Farmani, R., & Butler, D. (2018). State of SuDS delivery in the United Kingdom. *Water and Environment Journal*, 32(1), 9-16.

Miró, A., Hall, J., Rae, M., & O'Brien, D. (2018). Links between ecological and human wealth in drainage ponds in a fast-expanding city, and proposals for design and management. *Landscape and Urban Planning*, 180, 93-102.

Muthanna, T. M., Sivertsen, E., Kliwer, D., & Jotta, L. (2018). Coupling field observations and Geographical Information System (GIS)-based analysis for improved Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) performance. *Sustainability*, 10(12), 4683.

Nile, B. K., Hassan, W. H., & Esmael, B. A. (2018, November). An evaluation of flood mitigation using a storm water management model [SWMM] in a residential

area in Kerbala, Iraq. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 433, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

Noordwijk, M. V., Tanika, L., & Lusiana, B. (2017). Flood risk reduction and flow buffering as ecosystem services—Part 1: Theory on flow persistence, flashiness and base flow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(5), 2321-2340.

Ocampo, C., Carvajal-Escobar, Y., & Peña, L. E. (2019). Storm Water Management Model Simulation and Evaluation of the Eastern urban drainage system of Cali in the face of climate variability scenarios. *Ingeniería y competitividad*, 21(2).

Oladunjoye, O. A., Proverbs, D. G., Collins, B., & Xiao, H. (2019). A cost-benefit analysis model for the retrofit of sustainable urban drainage systems towards improved flood risk mitigation. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*.

Ossa-Moreno, J., Smith, K. M., & Mijic, A. (2017). Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK. *Sustainable Cities and Society*, 28, 411-419.

Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O., & Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature communications*, 9(1), 1-12.

Peng, H. Q., Liu, Y., Wang, H. W., & Ma, L. M. (2015). Assessment of the service performance of drainage system and transformation of pipeline network based on urban combined sewer system model. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(20), 15712-15721.

Perales Momparler, C. S. (2015). A regenerative urban stormwater management methodology. The role of SuDS construction and monitoring in the transition of a Mediterranean city (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

Perales-Momparler, S., Andrés-Doménech, I., Hernández-Crespo, C., Vallés-Morán, F., Martín, M., Escuder-Bueno, I., & Andreu, J. (2017). The role of monitoring sustainable drainage systems for promoting transition towards regenerative urban built environments: a case study in the Valencian region, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 163, S113-S124.

Pitt, M. 2008. "The Pitt Review Learning Lessons from the 2007 Floods." Accessed February 20, 2018. http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100702215619/http://archive.cabinetoffice.gov.uk/pittreview/thepittreview/final_report.html.

Programa de desarrollo urbano de centro de población de Mexicali (2025) <https://www.mexicali.gob.mx/24/pdf/AdministracionUrbana/pduc2025.pdf>

Qin, H. P., Li, Z. X., & Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of environmental management*, 129, 577-585.

Rezaei, A. R., Ismail, Z., Niksokhan, M. H., Dayarian, M. A., Ramli, A. H., & Shirazi, S. M. (2019). A quantity–quality model to assess the effects of source control

stormwater management on hydrology and water quality at the catchment scale. *Water*, 11(7), 1415.

Richard, D., (2016) UN –1995 to 2015, flood disasters affected 2.3 billion and killed 157,000. Floodlist URL: <http://1005//floodlist.com/dealing-with-floods/flood-disaster-figures-1995-2015>.

Riechel, M., Matzinger, A., Pawlowsky-Reusing, E., Sonnenberg, H., Uldack, M., Heinzmann, B., ... & Rouault, P. (2016). Impacts of combined sewer overflows on a large urban river—Understanding the effect of different management strategies. *Water research*, 105, 264-273.

Rodríguez Hernández, J. (2008). Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero. Universidad de Cantabria.

Roy, A. H., Wenger, S. J., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., Ladson, A. R., Shuster, W. D., ... & Brown, R. R. (2008). Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States. *Environmental management*, 42(2), 344-359.

Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental pollution*, 159(8-9), 2100-2110.

Sañudo-Fontaneda, L. A., Roces-García, J., Coupe, S. J., Barrios-Crespo, E., Rey-Mahía, C., Álvarez-Rabanal, F. P., & Lashford, C. (2020). Descriptive Analysis of the Performance of a Vegetated Swale through Long-Term Hydrological Monitoring: A Case Study from Coventry, UK. *Water*, 12(10), 2781.

Shafique, M., & Kim, R. (2018). Recent progress in Low-Impact Development in South Korea: Water-management policies, challenges and opportunities. *Water*, 10(4), 435.

Staddon, C., Ward, S., De Vito, L., Zuniga-Teran, A., Gerlak, A. K., Schoeman, Y., ... & Booth, G. (2018). Contributions of green infrastructure to enhancing urban resilience. *Environment Systems and Decisions*, 38(3), 330-338.

Sun, C., Romero, L., Joseph-Duran, B., Meseguer, J., Muñoz, E., Guasch, R., ... & Cembrano, G. (2020). Integrated pollution-based real-time control of sanitation systems. *Journal of environmental management*, 269, 110798.

Song, J. Y., & Chung, E. S. (2017). A multi-criteria decision analysis system for prioritizing sites and types of low impact development practices: Case of Korea. *Water*, 9(4), 291.

Swiss, R. (2014). Natural Catastrophes and Man-made disasters in 2013: large losses from flood and hail; Haiyan hits the Philippines.

Tang, Y. T., Chan, F. K. S., O'Donnell, E. C., Griffiths, J., Lau, L., Higgitt, D. L., & Thorne, C. R. (2018). Aligning ancient and modern approaches to sustainable urban

water management in China: Ningbo as a “Blue-Green City” in the “Sponge City” campaign. *Journal of Flood Risk Management*, 11(4), e12451.

Tayouga, S., and S. Gagné. 2016. “The Socio-Ecological Factors That Influence the Adoption of Green Infrastructure.” *Sustainability* 8 (12): 1277. doi:10.3390/su8121277.

Tortajada, C. (2016). Policy dimensions of development and financing of water infrastructure: The cases of China and India. *Environmental Science & Policy*, 64, 177-187.

Trapote, A., & Fernández, H. (2016) “Técnicas de drenaje urbano sostenible. Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales.” Alicante, España.

van Dijk, E., van der Meulen, J., Kluck, J., & Straatman, J. H. M. (2014). Comparing modelling techniques for analysing urban pluvial flooding. *Water science and technology*, 69(2), 305-311.

WAŁĘGA, A., & KSIAŻEK, L. (2015). The effect of a hydrological model structure and rainfall data on the accuracy of flood description in an upland catchment. *Ann. Wars. Univ. Life Sci. Land Reclam*, 47, 305-320.

Wang, M., Zhang, D. Q., Su, J., Trzcinski, A. P., Dong, J. W., & Tan, S. K. (2017). Future scenarios modeling of urban stormwater management response to impacts of climate change and urbanization. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 45(10), 1700111.

Ward, S., Staddon, C., De Vito, L., Zuniga-Teran, A., Gerlak, A. K., Schoeman, Y., ... & Booth, G. (2019). Embedding social inclusiveness and appropriateness in engineering assessment of green infrastructure to enhance urban resilience. *Urban Water Journal*, 16(1), 56-67.

Winsemius, H. C., Jongman, B., Veldkamp, T. I., Hallegatte, S., Bangalore, M., & Ward, P. J. (2018). Disaster risk, climate change, and poverty: assessing the global exposure of poor people to floods and droughts. *Environment and Development Economics*, 23(3), 328-348.

Woods-Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clark, H., Illman, S., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SuDS manual*, CIRIA 753. CIRIA. ISBN 979-0-86017-760-9.

Woznicki, S. A., Hondula, K. L., & Jarnagin, S. T. (2018). Effectiveness of landscape-based green infrastructure for stormwater management in suburban catchments. *Hydrological Processes*, 32(15), 2346-2361.

Xiang, C., Liu, J., Shao, W., Mei, C., & Zhou, J. (2019). Sponge city construction in China: policy and implementation experiences. *Water Policy*, 21(1), 19-37.

Yang, Q., Dai, Q., Han, D., Zhu, X., & Zhang, S. (2018). Impact of the storm sewer network complexity on flood simulations according to the stroke scaling method. *Water*, 10(5), 645.

- Yang, Y., Sun, L., Li, R., Yin, J., & Yu, D. (2020). Linking a storm water management model to a novel two-dimensional model for urban pluvial flood modeling. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(4), 508-518.
- Young, B. N., Hathaway, J. M., Lisenbee, W. A., & He, Q. (2018). Assessing the runoff reduction potential of highway swales and WinSLAMM as a predictive tool. *Sustainability*, 10(8), 2871.
- Yu, D., & Coulthard, T. J. (2015). Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydro-inundation model. *Journal of Hydrology*, 524, 385-400.
- Zevenbergen, C., Fu, D., & Pathirana, A. (2018). Transitioning to sponge cities: challenges and opportunities to address urban water problems in China. *Water*, 10(9), 1230.
- Zevenbergen, C., & Gersonius, B. (2007). Challenges in urban flood management. In *Advances in urban flood management* (pp. 13-24). CRC Press.
- Zhang, L., Yang, Z., Voinov, A., & Gao, S. (2016). Nature-inspired stormwater management practice: The ecological wisdom underlying the Tuanchen drainage system in Beijing, China and its contemporary relevance. *Landscape and urban planning*, 155, 11-20.
- Zhou, Q. (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water*, 6(4), 976-992.
- Zuniga-Teran, A. A., Staddon, C., de Vito, L., Gerlak, A. K., Ward, S., Schoeman, Y., ... & Booth, G. (2020). Challenges of mainstreaming green infrastructure in built environment professions. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(4), 710-732.