

Ciudad esponja: arquitectura natural contra inundaciones, caso de estudio Pachuca, Hidalgo

Sponge city: natural architecture against floods, case study Pachuca, Hidalgo

D. Anguiano-Samaniego  a,*^a Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Las inundaciones son un problema que con el paso de los años tiende a ser más constante debido al constante crecimiento urbano, reduciendo la permeabilización del suelo. En ese contexto, se analizarán métodos de infraestructura urbana y natural, enfocándose principalmente en "ciudades esponja" y sistemas de captación de agua. Teniendo como objetivo el evaluar las consecuencias que generan las inundaciones, así mismo, se analizarán estrategias de diseño para poder combatir este tipo de catástrofes al emplear infraestructura verde. De mismo modo, se contemplarán los resultados y beneficios de emplear modelos urbanos naturales, así como casos de estudio de éxito.

Palabras Clave: Captación, tratamiento, infraestructura verde, inundaciones, ciudad esponja.

Abstract

Flooding is a problem that tends to become more constant over the years due to ongoing urban growth, which reduces soil permeability. In this context, methods of urban and natural infrastructure will be analyzed, primarily focusing on "sponge cities" and water harvesting systems. The goal is to assess the consequences generated by flooding; likewise, design strategies will be analyzed to combat these types of disasters by employing green infrastructure. Similarly, the results and benefits of using natural urban models will be considered, as well as successful case studies.

Keywords: Capturing, treatment, green infrastructure, flooding, sponge city.

1. Introducción

A lo largo del tiempo, las inundaciones han sido un problema constante en ciudades donde su zona geográfica tiende a ser afectada por fenómenos hidrometeorológicos, ejemplo de ello: lluvias intensas, huracanes, desbordamiento de ríos o la falta de abastecimiento en infraestructura urbana, inclusive puede ser originado por el diseño de la ciudad y su infraestructura que afecta a la población en general. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los eventos de inundaciones han ido en aumento y sido más frecuentes en las últimas décadas.

En respuesta a ello, las "Ciudades esponja", son una estrategia de diseño urbano que buscan aprovechar y beneficiarse de dichos acontecimientos, mejorando la resiliencia hídrica mediante la integración de una o varias soluciones basadas en medios naturales (Li et al., 2017).

Empleando esta estrategia de diseño urbano se promueve el uso de infraestructura verde, la cual no depende del sistema de drenaje convencional y aprovecha el agua de las zonas inundadas para beneficio social, de mismo modo, al generar uno o varios puntos verdes dentro de la ciudad se crean parques, zonas de recreación o en dado caso humedales urbanos. El presente artículo analiza los principios y casos de éxito de ciudades esponja, discutiendo posibles desafíos urbanos, sociales, económicos y el beneficio que dicha estrategia de diseño urbano aporta a las ciudades.

Asimismo, la implementación de infraestructuras asociada a la construcción de las ciudades esponja no solo depende del diseño conceptual o el análisis de distintos proyectos, sino también de la adecuada gestión durante la construcción del proyecto y las características que el proyecto pueda llegar a requerir dependiendo del tipo y especificaciones que se requieren para este tipo de proyecto, puesto que, se exige que los procesos de la obra cumplan los distintos estándares

*Autor para la correspondencia: an376094@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: an376094@uaeh.edu.mx (Daniel Gibran Anguiano Samaniego).

Historial del manuscrito: recibido el 06/08/2025, última versión-revisada recibida el 22/10/2025, aceptado el 26/10/2025, publicado el 05/12/2025.
DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15621>



técnicos y materiales, obteniendo una garantía de que este tipo de construcciones basadas en la naturaleza cumplan con su función a lo largo de los años.

2. Metodología.

El presente estudio se realizó bajo un enfoque analítico/observacional/exploratorio, debido a que los datos obtenidos por partes de proyectos análogos provienen de fuentes secundarias puesto que, no se cuentan con proyectos urbanos de este tipo en el país; transversal, el objetivo es analizar el impacto generado a partir de estrategias de diseño e infraestructura natural, contemplando, analizando y estudiando proyectos urbanos en ciudades asiáticas que implementan principios de “ciudades esponja”.

3. Impacto que generan las inundaciones en zonas urbanas.

El constante crecimiento urbano ha sido abrumador en los últimos 40 años, entre 1985 y 2015 la mancha urbana ha crecido un 85% a nivel mundial, no solo absorbiendo poblaciones rurales aledañas, sino acaparando zonas no construidas de la periferia en distintas urbes, alcanzando 1.28 millones km² de construcción nuevos (Rentschler, 2012), esto no solo ha reducido la zona permeable del planeta, sino que ha expuesto a la población a ser más propensa a distintos desastres naturales, uno de ellos siendo las inundaciones, entre el año 2000 y el 2015 la población que aumento su riesgo a ser víctima de inundaciones creció entre 58-86 millones, es decir, un incremento del 34.1%, comparado con un crecimiento global del 18.6% siendo cifras alarmantes, particularmente para Asia oriental y zonas cercanas a la costa (Tellman, 2021), dentro de las zonas en riesgo puede incluir a ciudades con una infraestructura pobre que no está preparada para poder enfrentar este tipo de problemática.

La frecuencia de desastres ocasionados por inundaciones ha ido aumentando con el paso del tiempo, esto generado por la anteriormente mencionada reducción del área permeable, como resultado en los últimos 50 años han ocurrido más de 11 mil eventos de inundaciones en zonas urbanas, la constancia de inundaciones ha aumentado a partir del 2010 (OMM, 2010), puesto que desde ese año más de la mitad de las inundaciones han sido registradas. Dentro del ámbito ambiental, las consecuencias de la falta de suelo permeable generan pérdida vegetal, fauna y deterioro del ambiente.

Todo esto ha ocasionado consecuencias económicas notables a la hora de que un fenómeno de este tipo se presente, las inundaciones urbanas causaron una pérdida económica a nivel global de \$105 mil millones de dólares en 2021 (AON, 2021) generando que los países afectados tengan que tomar medidas para solucionar los problemas que fueron resultado por falta de planificación urbana eficaz, tomando datos más actuales la Organización Meteorológica Mundial (OMM) menciona que los daños anuales desde el 2015 han superado los \$40 mil millones de dólares anuales y afectan a casi 2.5 mil millones de personas alrededor del mundo y se proyecta que estas cifras tendrán un aumento constante hacia el año 2030. Ahora bien, la perdida monetaria no afecta solamente al gobierno de los países afectados, sino que es más notable en

ciudadanos promedio que han sido afectados por dicho acontecimiento. De acuerdo con ((III), 2020) sólo el 12% de las pérdidas de propiedades están aseguradas, perjudicando directamente a la vivienda de los afectados, al comercio local y a la infraestructura que no puede sobrellevar la catástrofe natural de una inundación, generando el estancamiento de aguas las cuales favorecen enfermedades como pueden ser el dengue, colera o gastroenteritis, más que el 30% de víctimas de inundaciones que lograron sobrevivir desarrollan trastorno de estrés posttraumático.

Lamentablemente las consecuencias ocasionadas por inundaciones no quedan tan solo en pérdidas económicas, sino que, el impacto de perdidas humanas como resultado de inundaciones es sorpresivamente notable, ya que se registran más de 6000 muertes anuales reconocidas por causa de ahogamiento al tratar de sobrevivir a una inundación, simplemente en Estados Unidos se registra una media de 106 muertes por inundación anuales (MDPI, 2019).

4. Ciudades esponja, beneficios sociales y ambientales.

Al buscar soluciones a las diversas problemáticas que pueden generar las inundaciones una de las estrategias a tomar en cuenta es el modelo urbano de “ciudades esponja”, no solo por ser una estrategia innovadora, sino que es una solución basada en la naturaleza y en el diseño que esta misma pueda tener de acuerdo al contexto de la zona, permitiendo captar, filtrar, almacenar y permitir reutilizar el agua de lluvia reduciendo la posibilidad de que la zona sea un área de riesgo a inundaciones, permite que el agua captada pueda emplearse al afrontar una sequía, al tener un punto esponja en la ciudad, más un buen diseño al contexto del área mejorará en grande la calidad de la vida urbana en la zona donde esta sea implementada y de la ciudad, si es que son situadas en puntos estratégicos para el beneficio de los ciudadanos.

Donde los beneficios no solo repercuten de manera positiva localmente, sino que se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030 (ONU), particularmente el punto 11 de la ODS “Ciudades y comunidades sostenibles”, en este se enlazan de manera perfecta los objetivos de la ciudad esponja con la ODS, buscando lograr asentamientos urbanos resilientes, inclusivos y seguros. De este modo, las ciudades esponja contribuyen con los múltiples riesgos que pueden ocasionar las inundaciones, mejorando la calidad de vida de los habitantes. A su vez, fortalece los puntos 6, 13 y 15 de la ODS, mejorando la gestión y reutilización del agua, mitigando los efectos extremos climáticos y fomentando la diversidad, demostrando que el modelo urbano sirve y cumple como herramienta para los compromisos internacionales de la sostenibilidad.

Al ser una solución que combina la arquitectura, urbanismo y naturaleza generará diversos beneficios ambientales empezando por la reducción de posibles inundaciones y estancaciones de agua en las urbes, puesto que al ser un punto permeable en la ciudad permite absorber grandes volúmenes de agua, la cual se dispersará hacia el suelo y la flora que se encuentra en el punto esponja, ya sea para el mantenimiento del punto esponja, restauración del suelo o bien captando y almacenando el agua para beneficio público inmediato o futuro. Al ser un microambiente controlado, permite el acceso a la fauna urbana y no urbana (dependiendo de la zona) generando la posibilidad de crear jardines de lluvia o

humedales los cuales ayudarán a la mitigación de las islas de calor, aportando un mayor confort térmico, apoyando a la purificación del aire.

Ahora bien, a la hora de hablar del salvaguardo civil y/o de infraestructura tenemos que contemplar la Gestión Integral del Riesgo (GIR) donde de acuerdo con la terminología de la UNISDR “busca la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas” (UNISDR, 2009), puesto que, los beneficios de incorporar infraestructura verde, zonas permeables y espacios donde la retención de agua para su aprovechamiento estén presentes, reduce la cantidad de superficies impermeables que pudiesen ocasionar escurrimientos peligrosos o estancamientos de agua, de mismo modo, ayudando al drenaje público para que este no sobrepase su capacidad. Así mismo, este modelo urbano es una forma de mitigación activa, es decir, que ayuda a que el cambio climático sea menor reduciendo las posibilidades de que las ciudades sean afectadas por olas de calor, sequias y contaminación del agua, de manera que los objetivos de la GIR se cumplen de manera involuntaria, dando como resultado una ciudad más preparada para posibles cambios climáticos.

Dentro de los beneficios económicos este tipo de proyectos urbanos son más rentables a largo plazo a comparación de las soluciones tradicionales, como ejemplo: se estima que Wuhan; China, ahorro casi 600 millones de dólares el emplear puntos esponja envés de un sistema de redes de drenaje tradicional (al., 2020), mientras que las zonas cercanas a los puntos esponja de la ciudad aumentaron en plusvalía.

Los beneficios que trae el tener estos punto de almacenamiento no es limitado al beneficio contra desastres naturales o económicos, puesto que, al generar espacios públicos accesibles ocasiona que estos tengan la posibilidad de ser algo más, de acuerdo con (Wetland, 2023): “los mercados con humedales” atraen a miles de visitantes en China, este mercado recibe más de 5000 visitantes a diario, occasionando que ya no aporte solo un valor de infraestructura, sino que de igual manera beneficia a la economía de la zona, de mismo modo, si el punto esponja es pensado/diseñado como un parque urbano será un nuevo espacio público dentro de la ciudad generando que quienes la habitan tengan un nuevo lugar donde relacionarse. Este tipo de espacios que pueden adaptarse a cambios o que puedan pensarse no solamente como un área verde, sino como un espacio de convivencia generara un sentimiento de pertenencia al ser un punto no tan común en el mundo, apoyando ya no solo a las urbes de manera urbanística, sino que de mismo modo estas obras arquitectónicas naturales también brindan identidad a ciudades que la necesitan.

[sponge-park-plus-centro-de-visitantes-uaos-design/6511edf10a1fc57f0dfedde-wuhan-sponge-park-research-plus-visitor-center-uaos-design-photo](https://www.spongewater.org/design/6511edf10a1fc57f0dfedde-wuhan-sponge-park-research-plus-visitor-center-uaos-design-photo)

5. Estrategias de diseño e infraestructura urbana aprovechando pendientes.

Si bien las ciudades esponja son una estrategia de diseño para evitar inundaciones y gestionar el agua pluvial, no se recomienda “robar” los proyectos anteriormente realizados, basados en este tipo de modelo urbano, ya que, las condiciones de estos proyectos son y serán sumamente diferentes a donde se requiera implementar este tipo de proyecto, puesto que, se debe de considerar la geografía, pendiente, ubicación, contexto de la zona, climá, etc... (Yu, 2019) para que cuando se quiera realizar el proyecto se obtengan los mejores resultados posibles.

A la hora de pensar un proyecto con este modelo urbano se debe de contemplar, planificar la captación y almacenamiento del agua en zonas estratégicas según la topografía del lugar, empleando las pendientes de la zona para guiar el flujo del agua hacia las áreas de retención natural del agua, con ello, se reducirá la velocidad del agua, disminuyendo el riesgo a inundaciones súbitas, permitiendo que el agua se infiltre gradualmente a los puntos esponja, comprendiendo lo anterior es imprescindible que la ubicación de los puntos esponja sean propuestos en zonas donde inician las inundaciones o en donde haya una potencial área de estancamiento de agua, ya sea por el diseño de las calles o si es la parte más baja de una zona con pendiente, otra estrategia en ese tipo de situaciones sería generar varios puntos esponja o “canales vegetados” a lo largo de zonas con pendientes suaves o pronunciadas, logrando filtrar el agua de escorrentía y como parte final implementar jardines de lluvia en los puntos más bajos, de este modo, se podrá retener y filtrar hasta un 99% de volumen de agua (Qin, 2020).

Dentro de la infraestructura urbana se podría implementar pavimentos permeables, de este modo se permitiría la infiltración de agua, de acuerdo con un estudio de: (Quagliolo, 2023), se ha demostrado que es posible obtener una reducción de hasta el 98% de escorrentía al implementar este tipo de pavimentos. Otra forma de ayudar a evitar estancamientos de agua o inundaciones sería añadir techos verdes en diversas construcciones, si bien, es complicado que la mayoría de los ciudadanos puedan implementar este tipo de diseño urbano en sus viviendas, los edificios gubernamentales o de sector público si cuentan con posibilidad de implementarlo, de este modo, ayudando a retener el agua de lluvia, liberándola lentamente reduciendo la presión en el sistema de drenaje (Qin, 2020).

Al tomar este tipo de diseño en el ámbito urbano, considerando la geografía y pendiente de cada zona, más el añadir sistemas de diseño urbano para el captar o controlar el agua se podría reducir la escorrentía urbana hasta en un 75% (EPA, 2019), disminuyendo la carga para el sistema de drenaje tradicional, resolviendo más de uno de los problemas que en su mayoría afecta a las ciudades que no cuenta con la infraestructura de drenaje a la hora de enfrentarse con fuertes lluvias, el desbordamiento de agua proveniente del sistema de alcantarillado, logrando evitar el estancamiento de agua y por consiguiente las enfermedades que el agua estancada ocasiona en la población que se ve afectada por esta.



Figura 1: Ciudad de Wuhan; China.

Autor/es de la fotografía: In Between, obtenida de:
<https://www.archdaily.mx/mx/1007839/centro-de-investigacion-de-wuhan->



Figura 2: Humedal construido para el tratamiento de aguas residuales.

Autor de la fotografía: Desconocido, obtenida de:
<https://www.fii.gob.ve/humedales-construidos-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>

6. Bases de una ciudad esponja.

A la hora de diseñar un proyecto de ciudad esponja se debe de realizar un análisis detallado y fundamentado para contemplar que tipo de materiales se deberán de usar, tomando en cuenta los materiales de la zona y cuales se adaptaran mejor al entorno en el que será realizado.

Las ciudades o puntos esponja son una estrategia de diseño de arquitectura natural, es decir, se deberán de emplear materiales enfocados en estructuras verdes y superficies permeables que permitan gestionar el agua de lluvia o de escorrentamiento urbano, dentro de los materiales base para proyectos como este se encuentra el pavimento permeable, debido a que espacios de este tipo están pensados para contribuir a la sociedad, es decir, habrá personas quienes lo usaran, por ende vías, caminos, banquetas o ciclovías serán consideradas dentro del proyecto, otra opción podrían ser los adoquines y/o ladrillos cerámicos, ya que su alta porosidad y durabilidad los hacen un material a considerar y como material de bajo costo podemos encontrar a la grava ya que permite el paso del agua hacia el sustrato del suelo.

El poder retener el agua es uno de los aspectos importante para proyectos como este, por ende el sustrato que deberá emplearse (mayormente si es un creado artificialmente) deberán ser ligeros y de alta porosidad como pueden ser mezclas de arena, compost y materia orgánica, favoreciendo la infiltración del agua y ayudando al desarrollo de vegetación, o si el contexto de la zona lo requiere, se podrían emplear superabsorbentes poliméricos, materiales en forma de gránulos que de acuerdo al fabricante permiten retener hasta 300 veces su peso en agua, estos polímeros son mezclados con el sustrato del suelo para poder mejorar la retención del agua en los puntos estratégicos de este modelo urbano.

Un aspecto fundamental en el diseño de las ciudades esponja es que se permite el almacenamiento de agua, donde las cisternas subterráneas modulares son las opciones más comunes en proyectos urbanos, la estructura prefabricada de estas permiten el almacenar el agua de lluvia que puede ser usada para el propio mantenimiento del proyecto o puede emplearse para uso público, estas se ubican por debajo del punto esponja, donde almacenan el agua de lluvia, o bien, pueden retener el agua de escorrentamiento urbano ocasionado por la pendiente a través de un sistema de drenaje inteligente con

sensores, controlando el agua que se retiene sin que se desborde, permitiendo almacenar grandes cantidades de agua, la cual posteriormente seria tratada, dándole uso al agua de escorrentamiento urbano.

Al diseñar una ciudad esponja se deberá de recordar que esta es pensada como un microambiente, por ende, la vegetación que se emplee deberá de ser la adecuada, recomendando principalmente vegetación local que pueda retener grandes cantidades de agua y que cuente con raíces de tamaño considerable, mejorando la estructura del suelo y la filtración del agua, de mismo modo la vegetación ayudará a reducir la erosión del suelo.

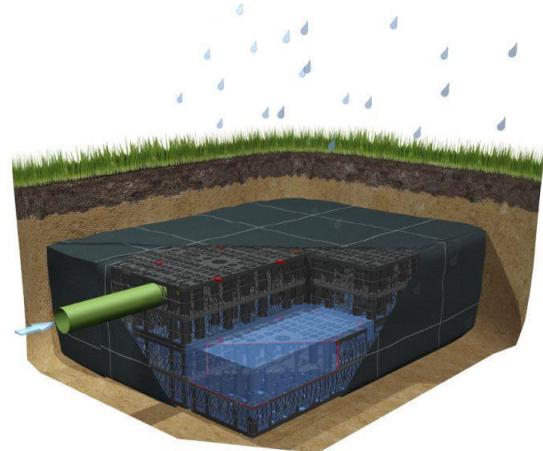


Figura 3: Diagrama de cisterna modular subterránea.

Autor del diagrama: duborain, obtenida de
<https://www.dyka.be/media/documents/documentation-technique-duborain-rainbox-3s-befr.pdf>

7. Captación pluvial

Al combatir contra los riegos provocados a partir de inundaciones, no se puede solamente confiar en los puntos esponja, estos son solo una estrategia de diseño, no una solución total para el problema, por ende, al ser acompañados por sistemas de captación pluvial se obtendrán mejores resultados al evitar catástrofes ocasionados por inundaciones y de mismo modo evitarlas.

Al contemplar sistemas de captación pluvial a escala urbana se deberá integrar más de una estrategia, como resultado, se deberá de tener la infraestructura necesaria al momento de combatir los posibles desastres, empezando desde las techumbres o tejados al implementar canaletas o bajantes de agua en edificios públicos, de este modo el agua que baje podrá ser recolectada y usada al pasar por un sistema de “First-Flush Diverter”, mecanismo que incluye una tubería de almacenamiento como deposito adicional en el que se captaran los primeros litros de agua, es decir, el agua que estuvo primeramente en contacto con la superficie de las techumbres o tejados, tomando en cuenta a la South Pacific Applied Geoscience Commission (SOPAC, 2004) “se recomienda descartar entre 0.5 y 1 litros de agua por metro cuadrado de superficie de captación de agua durante los primeros minutos de lluvia”, así mediante este sistema se descarta y almacena el agua recolectada dentro del pequeño deposito el agua residual, agua que no estará dentro del o los tanques de agua principal, donde será almacenada para uso público. Por su parte, dentro

de los tanques de almacenamiento se pueden contemplar los tanques HDPE o un sistema de cisternas modulares subterráneas, estas últimas, fueron empleadas en un sistema de “First-Flush Diverter” en el Aeropuerto de Frankfurt, Alemania, en donde almacenan anualmente 1 millón de metros cúbicos de agua pluvial en seis tanques de 100 metros cúbicos cada uno (Trautner, 2001).

La implementación de estos sistemas de captación ha demostrado resultados positivos en urbes que los han empleado de manera efectiva, ejemplo de ello es Berlín que capta aproximadamente 300,000 m³ litros de lluvia anual, reduciendo las posibilidades de desahogo de agua por parte de su sistema de drenaje y de mismo modo mejorando la calidad de vida de las personas (Wohnen, 2017). Otro ejemplo notable se encuentra en Aarhus, Dinamarca, donde la red urbana de captación pluvial y reutilización de agua se emplea para uso doméstico y en sanitarios públicos, lo que lo ha llevado a poder ahorrar hasta un 40% de agua potable anualmente (Brun, 2020). Como este ejemplo hay otros a lo largo del mundo, demostrando que al contemplar un sistema de captación pluvial se reduce el riesgo de sufrir inundaciones o el desbordamiento del sistema de drenaje por una infraestructura ineficaz, al igual que mejora la habitabilidad urbana, la calidad de vida y la calidad ambiental dentro de la ciudad.

Por consiguiente, para implementarlo se requiere de la divulgación y la contribución de diversos organismos para que estos lleguen a más personas y sean empleados en mayor cantidad, si bien, la Ley Estatal de Agua y Alcantarillado obliga a nuevas edificaciones a emplear infraestructura de captación de agua pluvial estas no tienden a estar en funcionamiento o el mantenimiento falto de estas hace que no funcionen de la mejor manera, por otro lado, la Ley Orgánica Municipal facilita capacitaciones, facultando a diversos municipios para promover y regular este tipo de sistemas, si bien la intención es positiva se desconoce si este tipo de capacitaciones son brindadas de manera efectiva y promueven el uso de diversos sistemas de captación y reutilización del agua. Asimismo, CAASIM como institución podría coordinar y ejecutar proyectos de infraestructura hídrica urbana, implementando dentro de estos la captación de agua de lluvia, asegurando que dichos proyectos sean compatibles y útiles con la ciudad. De esta manera, la normativa e infraestructura de la ciudad facilitaría la implementación del modelo urbano “Ciudades esponja”, integrándose de manera orgánica y legal tomando en cuenta la planificación urbana y resiliencia de esta. Se entiende que el implementar sistemas de captación pluvial en edificaciones de gran tamaño conlleva a costos iniciales elevados, sin embargo, los beneficios tangibles a largo plazo son mayores que la desventaja monetaria momentánea, la reducción de inundaciones, recarga de mantos acuíferos, el volumen de agua a beneficio público, entre otros, son beneficios que ayudaran a miles de habitantes si se llegase a implementar este tipo de sistemas pluviales.



Figura 4: First Flush Diverter empleado en una complejo departamentario.

Autor de la fotografía: Desconocido, obtenida de: <https://arkitrek.com/first-flush-diverter/>

8. Diseño colaborativo entre sistemas de captación y puntos esponja.

En proyectos urbanos a gran escala se considera plantearlos como multidisciplinarios, donde se requerirá la coordinación entre arquitectos, ingenieros, urbanistas, ecólogos, sociólogos, etc... para entender las necesidades de los habitantes, facilitar el diseño y mejorar la planificación de proyectos de esta magnitud, combinando estructuras verdes con ingeniería y tecnología. Al conjuntar sistemas de captación pluvial y los puntos esponja, ambos sistemas enfocados en captación y reutilización de agua se podrán obtener resultados más eficientes, donde los sistemas de captación pluvial podrán recolectar y redirigir el agua de lluvia hacia los puntos esponja dando como resultado un sistema urbano hidrológico eficaz. Ejemplos de este sistema hidrológico es la ciudad de Zhengzhou, China, donde se ha logrado reducir el más de 30% de escorrentía superficial en temporada de lluvias (Li, 2019). De mismo modo, el parque Olímpico de Australia combina la captación pluvial con sistemas de tratamiento de agua logrando ahorrar más de 850 millones de litros de agua potable, siendo equivalente al 50% del consumo de agua en la ciudad (Authority, 2020).

Al emplear estos sistemas en conjunto no solo se beneficia a las urbes en cuestión hidrológica, de acuerdo con (O'Sullivan, 2024) en Estados Unidos en el proyecto “Imperial Beach” al combinar sistemas de captación jardines de lluvia/puntos esponja y sistemas de cisternas se logró reducir hasta 13 millones de kilogramos de CO₂, reduciendo la carga contaminante en un 3.4%.

La sinergia de estos sistemas de reutilización y captación de agua es notable, sin embargo, añadir otros sistemas de energía verde podrían complementar la composición de la calidad del diseño urbano, generando ciudades autosuficientes empleando su propia energía ya sea eólica, solar o la que sea más acorde al contexto de la zona donde este diseñada, maximizando ya no solo beneficios ambientales, sino que simultáneamente mejorando la economía al reducir gastos en infraestructura urbana, servicios básicos e incrementando la calidad de vida de las personas de quienes la habitan.

Ahora bien, si esto se intenta trasladar de manera nacional, de podría integrar siguiendo la legislación y coordinación institucional con CAASIM, asegurando que estos no sean solamente viables/construibles, sino que están dentro de los rangos de legalidad y sostenibilidad dentro del país/estado; permitiendo que tanto la infraestructura y los puntos esponja funcionen de manera conjunta bajo un marco normativo fomentando la resiliencia urbana y la gestión integral de riesgos bajo una posible nueva normativa para este tipo de proyectos dentro del país.

Todas estas sinergias generadas entre tecnología, ingeniería, arquitectura y naturaleza son la clave para crear ciudades resilientes al cambio climático que se esperan en los próximos años, de acuerdo con el estudio de (E., 2024) se estima que habrá cambios climáticos notorios dentro de los próximos 20 año, empezando desde el 2027 afectando varias ciudades del mundo y estos proyectos urbanos son soluciones a estos cambios dentro del corto, mediano y largo plazo.

Mundialmente se puede encontrar evidencia de que soluciones aisladas no son la respuesta a los problemas climáticos a los futuros cambios, sino que la solución a la que se debe llegar es una donde se mezclen sistemas inteligentes, sostenibles y adaptables a los cambios que se aproximan en un futuro. El “apostar” a este tipo de soluciones urbanas dejan de ser una apuesta con la evidencia demostrada y que va en aumento internacionalmente, los beneficios que traen y los resultados positivos son muestra que los sistemas de construcción natural son a futuro la solución a problemas urbanos futuros.



Figura 5: Parque Olímpico de Sydney.

Autor la fotografía: Desconocido, obtenida de: <https://turismo.org/que-ver-en-sidney/>

9. Deficiencia infraestructural en plantas de tratamiento

La falta de relevancia hacia las plantas de tratamiento no solo en el estado, sino en el país es alarmante, de acuerdo a datos de (CONAGUA, 2022) se registran 3,661 plantas de tratamiento de agua alrededor del país, de las cuales operan 2,786, sin embargo el 45% (1,255) de estas plantas no cumplen las normas del reglamento proporcionado por parte de CONAGUA, dando como resultado a que 1,520 plantas de agua estén en funcionamiento y cumplan con lo reglamentado, es decir, la población mexicana (131.1 millones de habitantes de acuerdo a (INEGI, 2025)), contempla que una planta de tratamiento de agua tendrá que cubrir la necesidad de 86,125

habitantes, si bien el rendimiento de esta infraestructura se mide en la capacidad en litros por segundo, el promedio de las plantas en funcionamiento dentro del país es de 23,000 L/s, la cual cubre las necesidades de agua a 21,600 habitantes, es decir, las plantas que hay en México deberían de operar al 400% para cubrir la necesidad de la población en general.

Trasladando esta información a Pachuca de Soto; Hidalgo, lugar del caso de estudio, en existencia hay dos plantas de agua, sin embargo, solamente una está en operación, con un rendimiento de 100 L/s, produciendo agua que puede cubrir hasta 43,200 habitantes, no obstante, la población de la urbe ha crecido abismalmente, contando actualmente con 692,702 habitantes (Review, 2025), con dichos datos se estima que la planta debería de estar trabajando al 1603% de su capacidad base para poder solventar a la población.

Si bien las plantas de agua son más un método de reciclaje de agua y no son indispensables para los habitantes de las ciudades, son una herramienta que podría ayudar a solucionar la escases de agua en el país, más cuando desde el 2010 ha existido una sequía de agua en México (MDPI, 2023), llegando a ser una crisis severa para toda la nación desde el 2021, donde el 85% de los habitantes mexicanos sufrió la necesidad de agua (Martínez, 2025), sin remarcar el caso más reciente en 2023, año en el que existió una sequía extrema, en la cual 30 de los 32 estados de la república mexicana (Reuters, 2024), sufrieron la escases de uno de los recursos primordiales para la vida humana. Añadiendo, se espera que en el año en curso (2025) entre 14 y 20 estados sufran un agotamiento de agua, especialmente en el norte y centro del país (Reuters, Mexico's water deficit persists even after torrential summer rains., 2025).

Cabe mencionar que proyectos de gran envergadura tienden a usar plantas de tratamiento al justificar la falta de área permeable en sus proyectos a realizar, si bien es una solución para sustituir el área permeable la mayoría de estas no cumplen con los requisitos o están completamente inutilizadas, desestimando de esta manera la “solución” que estas empresas proponen.

Siguiendo los datos proporcionados por (INEGI, Proyecciones de población municipal, 2021-2040, 2023) el desinterés por parte de gobernantes y empresas privadas en relación al uso de agua se proyecta a la alza, más cuando no se contemplan los cambios urbanos y climáticos que afrontaran las diversas ciudades en los próximos años, situándonos en Pachuca; Hidalgo se contempla que la población combinada entre Pachuca y Tizayuca alcance los 1,304,892 habitantes para 2040, cifras que al compararla con los datos proporcionados de (LLC., 2023) estima que en 2030 entre 14-20 estados de la república, donde se incluye a Hidalgo enfrentaran un desabasto de agua en más del 80%, es decir, aproximadamente 1,043,914 habitantes sufrirán escases de agua en las ciudades de Pachuca y Tizayuca.

10. Implementación de plantas de tratamiento en diseño urbano (ciudades esponja).

A lo largo del artículo se ha mencionado la función principal de las ciudades esponja es la captación y mantenimiento de agua, no obstante, no es suficiente con solo infiltrar o retener el agua, sino que es/será clave el poder reutilizar esa agua, por ende, el tratarla o purificarla para su

uso es indispensable, obteniendo un funcionamiento beneficioso a la población en general.

El enfoque sería centralizar todos los procesos de la ciudad esponja, es decir, captar, tratar y almacenar el agua para uso público en el mismo lugar, por ende, la estrategia propuesta son las plantas de tratamiento “paquete”, estas son sistemas compactos y modulares diseñados para el tratamiento de agua, al ser prefabricadas el proceso de instalación será más fácil y práctico, cabe recalcar que el número de plantas paquete dependerá de la dimensión del proyecto a realizar, al contemplar mayor extensión requerirá un mayor número de plantas (CONAGUA, Manual para el diseño y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales., 2018). Otra facilidad que este método de tratamiento ofrece es que pueden ser automatizadas mediante control y monitoreo, facilitando su operación. Dentro del diseño serán integradas de manera subterránea, de esta manera no afectaran al paisaje urbano, reducirá el ruido y el olor generado por la planta de tratamiento y la temperatura del subsuelo favorecerá la estabilidad biológica del sistema. Al contemplar estas plantas de manera subterránea se requerirá contemplar un sistema de ventilación para evitar la acumulación de gases, de mismo modo, se debe diseñar un acceso para su debido mantenimiento, así como el monitoreo que requerirá estas plantas de tratamiento. Este método conjunto de captación y reutilización de agua podría ser implementado tanto en áreas de gran dimensión como en zonas con un espacio limitado como podrían ser fraccionamientos, plazas comerciales, edificios de oficina, etc...

Ahora bien, en espacios públicos se podrían emplear otros métodos de tratamiento de agua, siguiendo un diseño dentro de las ciudades esponja, al crear humedales y/o lagos artificiales, su tratamiento sería por el método de biorremediación, método natural que emplea organismos vivos (plantas, bacterias, hongos y microorganismos del suelo) para eliminar, degradar o transformar los contaminantes del agua en compuestos inocuos. De esta manera el agua eliminaría/degradaría contaminantes tales como metales pesados, nitratos, fosfatos, hidrocarburos y coliformes fecales (Gadd, 2004), no obstante, el agua tratada no sería apta para consumo humano, sino que serviría para el mantenimiento del punto esponja, ya sea por un sistema de bombeo que conecte a un sistema de riego o por gravedad, como ejemplo se encuentra el Benjakitti Forest Park (Bangkok, Tailandia), con una dimensión de 42.3 hectáreas, retiene hasta 128,000m³ de agua de lluvia anualmente (Architects., 2020), en el proyecto emplearon técnicas de *cut and fill* para modificar y aprovechar la topografía del terreno, excavando zonas específicas creando lagunas, estanques y canales artificiales que funcionan como depósitos y zonas de tratamiento de agua pluvial y escorrentía urbana, la tierra extraída la emplearon como relleno para elevar otras áreas del parque, formando islas, senderos y plataformas para áreas verdes, el parque genera 1,600m³ de agua limpia diaria mediante procesos de biorremediación (Arsomslip Community and Environmental Architect, 2022), su forma de tratamiento funciona mediante gravedad, donde el agua fluye hacia lagunas poco profundas donde se detiene el movimiento rápido del agua, permitiendo la sedimentación de las partículas que trae el agua consigo, al aprovechar la pendiente y la gravedad el agua continua fluyendo hacia áreas del humedad con vegetación donde se filtran nutrientes, metales pesados y contaminantes orgánicos y por ultimo llegan a la tercera isleta

donde hay plantas acuáticas y microrganismos que realizan la biorremediación, filtrando nutrientes y el resto de contaminantes orgánicos, el mantenimiento del parque es igual por medio de la pendiente y canales diseñados para que el agua trasmire a zonas específicas manteniendo vivo el parque. Cabe mencionar que esta última es parte de un sistema urbano mayor de gestión sostenible del agua donde la orografía, infraestructura, geografía y pendiente son base para el proyecto urbano que maneja Tailandia.

11. Caso de estudio teórico (Río de las avenidas).

- Ubicación propuesta: Corredor urbano “Río de las avenidas” Pachuca de Soto; Hidalgo, México
- Año de formulación: 2025
- Superficie proyectada: 8.7km lineales/145 hectáreas de intervención directa
- Tipo de proyecto: Planeación urbana, infraestructura verde, mitigación de áreas inundables, recreación, espacio público.

Contextualización de la zona: Pachuca de Soto, uno de los principales centros metropolitanos del estado de Hidalgo, ha demostrado ser vulnerable a inundaciones a lo largo de su historia, destacando la gran inundación de 1949. Evento que marcó la historia del estado en la conciencia colectiva sobre la gran problemática que generan las inundaciones, evidencian en el pasado y en años actuales la deficiencia infraestructural de drenaje en la ciudad, dando a relucir la necesidad de implementar medidas de prevención y mitigación dentro de la ciudad. Sin embargo, la impermeabilización del suelo dentro de la ciudad cada vez es mayor ocasionando episodios de inundaciones y estancamientos de agua de manera constante. A ello, podemos añadir la sobreexplotación del acuífero Cuautitlán-Pachuca, exponiendo el déficit hídrico dentro de la urbe, donde, de acuerdo con (CONAGUA, 2024) la extracción anual supera la disponibilidad media del acuífero.

De mismo modo, recalco que una tercera parte de la población de Pachuca recibe agua mediante tandeo (Zavala, 2025), representando un déficit considerable de agua en la urbe, así como una baja cantidad de áreas verdes y permeables por habitante, tomando en cuenta más de 30 hectáreas de suelo subutilizado o abandonado a lo largo del corredor fluvial que contienen un potencial de reactivación ecológica haciendo esta zona llamativa como un futuro hito para el modelo urbano planteado.

A su vez, dentro del análisis del Atlas de Riesgo Estatal y Municipal, resalta la zona del “Río de las avenidas” como un área con alto riesgo de inundación, reforzando la intervención contemplada en dicha área.

No obstante, se debe reconocer que el Río de las Avenidas no pertenece únicamente a Pachuca de Soto, sino que involucra a diversos municipios, donde se encuentran: Mineral de la Reforma, Zapotlán y Zempoala, por lo que se requerirá de una gestión hídrica intermunicipal, en la cual se coordinaran los diversos municipios para gestionar el agua tratada y residual de manera conjunta.

Justificación del proyecto: Surge como respuesta al constante problema de inundaciones que se presentan en la zona durante la temporada de lluvias, ocasionadas por la nula permeabilización del suelo, infraestructura insuficiente, falta

de área permeable y natural de la zona. Buscando transformar un espacio público poco aprovechado y transitado por los ciudadanos en un espacio público que implemente infraestructura verde resiliente, basándose en el modelo urbano de “Ciudades esponja” que permita la captación, tratamiento y reutilización del agua pluvial, al mismo modo, creando un espacio recreativo y de convivencia para la comunidad.

Se propone rediseñar de manera integral el “Río de las avenidas”, siendo parte de una futura estrategia urbana basada en el modelo de “ciudades esponja”, enfocándose en la zona planteada, previniendo inundaciones, recargando mantos acuíferos aledaños, tratamiento de agua, reutilizamiento de esta misma y ampliar/incorporar un antiguo espacio público a una futura planeación urbana a base de este modelo.

Objetivos del proyecto: Se plantea como punto principal emplear soluciones naturales para el manejo de agua pluvial de manera local, así como integrar/crear parques en la ciudad de manera lineal, los cuales se conecten mediante canales basándose sistemas de biorremediación, aprovechando la topografía de la ciudad, con ellos crear humedales artificiales y jardines de lluvia, conformando un nuevo tejido urbano que reduzca la impermeabilidad que hay en la zona y promover un modelo replicable en zonas similares en el país.

El diseño de este proyecto contempla la incorporación de arquitectura natural y diseño urbano resiliente, integrando elementos del entorno natural al trazado urbano sin alterar su dinámica ambiental, beneficiándose de la longitud del corredor en donde se contempla la reforestación con especies locales y la creación de delimitaciones vegetales que definan/delimiten las zonas de tratamiento de agua, actividades recreativas y públicas, así como los espacios de servicio.

De mismo modo, la ubicación del corredor resulta apropiada para añadir de manera estratégica edificios públicos y/o privados ya construidos que cuenten con gran envergadura colindantes a la zona, los cuales podrían implementar cañerías o bajantes que pasen por un sistema “First-Flush Diverter” el cual podría conectarse al punto esponja para el tratamiento de agua captada por dichas estructuras, reduciendo el agua que podría estancarse en el área, así mismo centralizar un ciclo constante de tratamiento de agua al añadir plantas de tratamiento “paquete” en zonas estratégicas para que el agua que sea captada por escorrentía o por las bajadas de las edificaciones sea tratada y tenga un segundo uso para el mantenimiento del parque o bien sea para la población en general.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta la actual función del río de las avenidas, la cual es el transporte de agua residuales de distintos sectores de la ciudad, por ello, se propone reconfigurar el río como un sistema urbano híbrido de gestión de agua, el cual sea capaz de integrar de manera simultánea los procesos de captación, tratamiento, filtración y reutilización dentro del corredor aprovechando el trazo y la extensión de este para incorporar tecnologías descentralizadas de tratamiento hídrico, conformando un sistema integral de infraestructura verde y azul, en donde la ingeniería hidráulica y los procesos ecológicos actúan de manera complementaria.

Cabe recalcar que deberán de realizarse estudios estructurales, así como estudios de vulnerabilidad y riesgo al considerar realizar el proyecto urbano planteado, evitando infortunios estructurales que puedan poner en peligro a los habitantes.

Se empleará un modelado digital hidrológico con software SWMM para simular el comportamiento del sistema, así como el uso de un análisis SIG para mapear las zonas con un mayor riesgo de escorrentía e identificar espacios estratégicos donde se puedan seguir implementando puntos esponja reduciendo las inundaciones o el estancamiento del agua en la ciudad.

Tras la realización del proyecto de estima un aumento del índice de áreas verdes en la zona, pasando de 2.5m^2 a 7m^2 , así mismo una captación potencial de $180,000\text{m}^3$ de agua pluvial al año, la cual cuenta con la capacidad de ser tratada para mantenimiento y el uso personal. Como final se espera mejorar la calidad ambiental del aire y general, de igual manera crea una mejora paisajística para al menos 4 colonias marginadas. Resultando como una posible solución a inundaciones y estancamiento de agua, igualmente presentará un beneficio a la sociedad al generar agua para el uso público, creando espacios sociales, parques urbanos, reduciendo el mal olor generado por el alcantarillado en el río de las avenidas y por último dando una imagen nueva a Pachuca al implementar estrategias de diseño natural, siendo esta la única en el país.

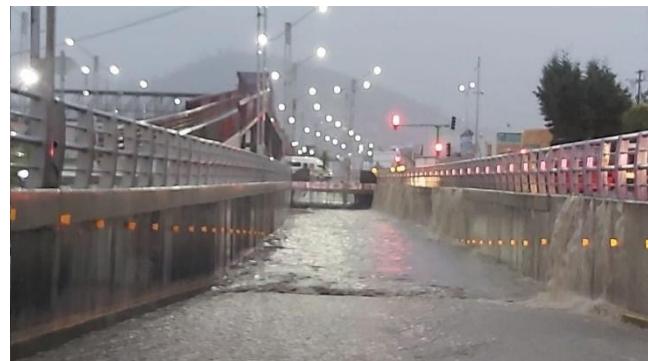


Figura 6: Paso deprimido del Río de las Avenidas inundado.

Autor la fotografía: Desconocido, obtenida de:

<https://queretaro.quadratin.com.mx/inundacion-en-pachuca-rebaso-los-4-metros-de-altura-familias-afectadas/>

12. Conclusiones

Al generar un diseño urbano contemplando e integrando sistemas de captación pluvial con puntos esponja son notables los beneficios que trae consigo el uso de estas prácticas de diseño natural y de infraestructura al prevenir posibles desastres y reducir riesgos que puedan traer consigo las inundaciones.

En los análisis estudiados en el artículo los resultados de implementar este sistema urbano fueron casi inmediatos, si bien, el costo a corto plazo es notorio, con el paso del tiempo este se verá reducido y traerá beneficios de todo tipo a las urbes que contemplen este modelo urbano.

Ahora bien, trasladando este modelo urbano al caso de estudio conceptual en el corredor “Río de las avenidas” se presenta como una alternativa sostenible y una posible solución a los problemas de inundaciones y escasez de agua que se viven en la ciudad de Pachuca, Hidalgo. No obstante, a la hora planificar este proyecto se contemplarán los marcos legales necesarios, tales como la Ley de Aguas Nacionales, Ley Estatal de Agua, Alcantarillado del Estado de Hidalgo y los debidos Reglamentos Municipales de Desarrollo Urbano y Construcción, con ello se podrá establecer de manera concreta

el aprovechamiento, tratamiento y disposición del agua pluvial, así como la infraestructura sostenible contemplada. Por ende, será un trabajo colaborativo con los gobiernos municipales, los cuales tendrán la responsabilidad de mantener y regular la estructura, de mismo modo, se coordinará con organismos como CAASIM y CONAGUA para garantizar que todo se lleve de la mejor manera dentro del marco legal.

Pese a parecer beneficioso en todos los aspectos, el implementarlo requerirá de una cantidad importante de estudios para que sea llevado de la mejor manera posible considerando todos los aspectos que conlleva el diseñar este y cualquier proyecto a gran escala urbana, ya sean sociales, políticos, geográficos, económicos, etc... por consiguiente, se recomienda seguir estudiando y analizando futuras ciudades esponjas, así como dar seguimiento a los proyectos plasmados en el artículo para estudiar la evolución de este modelo urbano.

Referencias

- (III), I. I. (2020). *National Flood Insurance Program (NFIP)*. Insurance Information Institute (III).
- al., O. e. (2020). *Sponge City Wuhan*. Wuhan: Oates et al.
- AON. (2021). *2021 Weather, Climate & Catastrophe Insight*. Texas, Estados Unidos: AON.
- Authority, S. O. (2020). *Community user guide: Water use*. Sydney, Australia.
- Brun, M. (2020). *Rainwater for washing machines and toilets cut water consumption by 40 %*. Aarhus, Dinamarca: Aarhus Vand.
- E., C. (2024). Strong regional trends in extreme weather over the next two decades under high- and low-emissions pathways. *Nature Geoscience*, volumen 17, 845–850.
- EPA. (2019). *Green Roof*. OMM.
- Li, Q. (2019). Comprehensive Performance Evaluation of LID Practices for the Sponge City Construction: A Case Study in Guangxi, China. *Environ.*
- MDPI. (2019). Flood Fatalities in the United States. *Water*.
- OMM. (2010). *EM-DAT*. ONU.
- O'Sullivan. (2024). *An integrated framework for stormwater management and life cycle assessment of rainwater harvesting: A comparative study of two underserved communities*. *Science of The Total Environment*. O'Sullivan.
- Qin, Y. (2020). *Urban Flooding Mitigation Techniques: A Systematic Review and Future Studies*. Guilin, China: Water.
- Quagliolo, C. (2023). *Experimental Flash Floods Assessment Through Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Model: The Case Study of Ligurian Coastal Cities*. Liguria, Italia: Frontiers.
- Rentschler, J. (2012). *Rapid Urban Growth in Flood Zones: Global Evidence since 1985*. Wolfsburg, Alemania: World Bank Account.
- SOPAC. (2004). *RWH Technical Fact Sheet 2A: First Flush Diverters*. Washington, Estados Unidos: SOPAC.
- Tellman, E. (2021). Floods. *Nature*, 41-46.
- Trautner, H.-J. (2001). *Rainwater utilization at the Frankfurt Airport*. Frankfurt, Alemania: Frankfurt.
- Wetland, L. (2023). *Ramsar Humedal*. Wuhan, China: Mengmeng et al.
- Wohnen, S. f. (2017). *Atlas Ambiental*. Berlín, Alemania : Atlas Ambiental.
- Yu, K. (2019). *Sponge City*. Wuhan, China: Esri.
- Architects., I. F. (2020). *Urban forest parks and sustainable water management: The case of Benjakitti Forest Park, Bangkok*. *IFLA Journal*, 402-412.
- Arsomsilp Community and Environmental Architect, & T. (2022). *Benjakitti Forest Park: Transforming a brownfield into an urban ecological sanctuary*. Archdialy.
- CONAGUA. (2018). *Manual para el diseño y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. CONAGUA.
- CONAGUA. (2022). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*, diciembre 2022. Gobierno de México. Ciudad de México: CONAGUA.
- Gadd, G. M. (2004). *Microbial influence on metal mobility and application for bioremediation*. *Geoderma*, 109-119.
- INEGI. (2023). *Proyecciones de población municipal, 2021-2040*. INEGI.
- INEGI. (2025). *Proyección de población de México, 2023-2025*. Ciudad de México: INEGI.
- LLC., S. &. (2023). *Más estados mexicanos podrían verse afectados por estrés hídrico en 2050*. S&P Global.
- Martínez, E. (2025). En México, 80% de habitantes ha sufrido escasez de agua; 45% de hogares almacena agua de forma inadecuada. El universal.
- MDPI. (2023). *Drought and vulnerability in Mexico's forest ecosystems. Forests*. MDPI.
- Reuters. (2024). *Suffering drought, heat, blackouts, Mexicans head to the polls*. Reuters. CONAGUA.
- Reuters. (2025). *Mexico's water deficit persists even after torrential summer rains*. CONAGUA.
- Review, W. P. (2025). *Pachuca de Soto*. World Population Review.
- Zavala, L. (2025). *El 33 % de las colonias de Pachuca enfrentan tandeo de agua*. CAASIM.
- Nueva York, Estados Unidos: ONU.
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Obtenido de Terminology: Basic terms on disaster risk reduction: https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf*