






Desbordamiento del Río Tula: más allá de las lluvias Tula River overflow: Beyond the rains

E. P. Castañeda-Ovando ^a, Y. Mendoza-Tolentino ^b, J. Añorve-Morga ^c, S. Nieto-Velázquez ^c, A. Castañeda Ovando ^{c,*}

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Departamento de Energías Renovables, Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital, 42184, 42300, Ixmiquilpan, Hidalgo, México.

^c Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El río Tula es un cuerpo de agua en el que desembocan aguas residuales y pluviales provenientes del Valle de México y zona conurbada. Durante décadas, el río Tula ha sido objeto de múltiples investigaciones, ya que las aguas residuales se han utilizado para la irrigación de cultivos, generando problemas de salud a la población local. Aunado a esto, y debido a los fenómenos hidrometeorológicos presentados durante septiembre de 2021 en la zona centro de México, el río Tula se desbordó, lo que afectó a la población del Valle del Mezquital, causando la muerte de 16 personas y dejando pérdidas materiales importantes. Por lo que, en esta revisión se resume la relación que tienen las inundaciones con el cambio climático y socioeconómico, teniendo especial interés en el sistema de drenaje de la zona metropolitana del Valle de México y la relación que tiene con el desbordamiento del río Tula.

Palabras Clave: Río Tula, Desbordamiento, Aguas Residuales, Contaminación, Fenómeno Hidrometeorológico, Inundaciones.

Abstract

Tula River is a body of water into which wastewater and rainwater flow from the Valley of Mexico and the metropolitan area. For decades, Tula River has been the subject of several research, as wastewater has been used for irrigation of crops, causing health problems to local population. Additionally, and due to the hydrometeorological phenomena that occurred during September 2021 in central Mexico, Tula River overflowed, which affected the population of the Mezquital Valley, causing the death of 16 people and leaving significant material losses. Therefore, in this review summarize the relationship that floods have with climate and socioeconomic change, having special interest in the drainage system of the metropolitan area of the Valley of Mexico and their relationship with the overflow of Tula River.

Keywords: Tula River, Overflow, Wastewater, Pollution, Hydrometeorological Phenomena, Floods.

1. Introducción

El cambio climático es un fenómeno que ha llamado la atención mundial y se refiere al cambio en los patrones climáticos, el cual es causado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero (Fawzy *et al.*, 2020). El cambio climático ha tenido gran impacto a nivel mundial, provocando serios problemas ambientales que repercuten directamente a la vida humana (Gran-Castro & Ramos, 2019).

El cambio climático se asocia a varios riesgos, entre los que destacan: el incremento en el nivel del mar, las inundaciones, lluvias extremas, incremento de calor, sequía y escasez de agua, entre otras (Fawzy *et al.*, 2020). Estos riesgos no han sido

exclusivos de alguna región, sino que han ocasionado serios problemas en muchos países, y México no es la excepción.

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), los desastres de tipo hidrometeorológico son los que provocan mayores daños y pérdidas en nuestro país; de hecho, en el 2020 se registró que el 83.4% del valor de las afectaciones totales se generó por este tipo de catástrofes, en los que desafortunadamente se reportaron 116 defunciones (CENAPRED, 2021).

México es altamente vulnerable a los fenómenos hidrometeorológicos, debido a que se localiza entre las zonas ciclogénicas del Atlántico Norte y el Pacífico Nororiental. Tan sólo en los primeros nueve meses del 2021, se registraron cuatro ciclones tropicales en la zona del Pacífico, entre ellos la

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

Correo electrónico: profe_288@uaeh.edu.mx (Evdio Pedro Castañeda-Ovando), ymendoza@utvm.edu.mx (Yucundo Mendoza-Tolentino), jmorga@uaeh.edu.mx (Javier Añorve-Morga), nieto@uaeh.edu.mx (Silvia Nieto-Velázquez), ovandoa@uaeh.edu.mx (Araceli Castañeda-Ovando).

tormenta tropical Dolores y tres huracanes (Enrique, Nora y Olaf); mientras que para el Atlántico se presentó sólo el Huracán Grace (SMN, 2021). Debido a la ubicación geográfica del estado de Hidalgo, éste se ve afectado por los fenómenos hidrometeorológicos que afectan tanto el Atlántico, como el Pacífico, tal como se muestra en los mapas de la Figura 1.

Las lluvias ocasionadas por estos fenómenos, aunado a los severos problemas de drenaje que presenta la Ciudad de México y zona metropolitana, han provocado que tanto presas, como ríos en los que desemboca el agua proveniente de esta región, superen su máximo de capacidad, lo que es el origen del desastre presentado en la Ciudad de Tula y municipios aledaños en los que el Río Tula atraviesa.

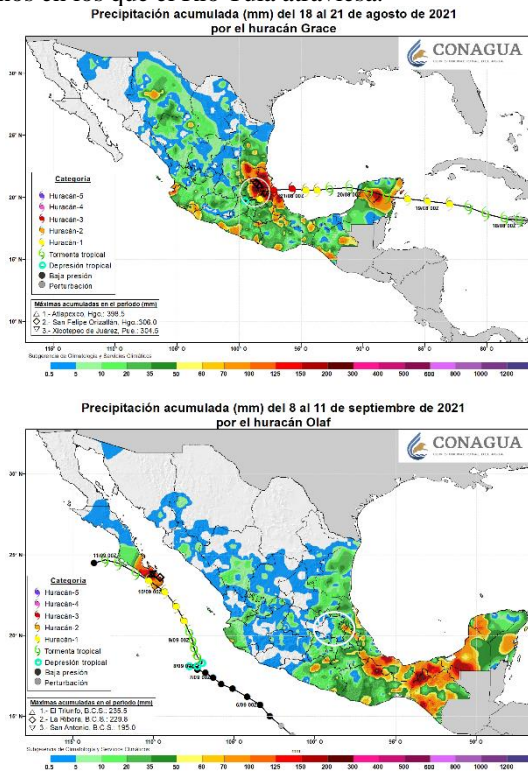


Figura 1: Mapas de precipitación acumulada por dos fenómenos hidrometeorológicos, uno del Atlántico (huracán Grace) y otro del Pacífico (huracán Olaf). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2021.

Por lo que, el objetivo del presente trabajo es realizar una revisión acerca de las causas del desbordamiento del Río Tula, poniendo especial interés en su relación con los problemas del sistema de drenaje de la Ciudad de México y área metropolitana.

2. Incremento del Riesgo de Inundaciones: Efecto de los Cambios Climático y Socioeconómico

En los últimos 100 años se ha observado que la temperatura de la superficie se ha incrementado en aproximadamente 0.75°C y se ha proyectado que, si las emisiones de gases de efecto invernadero no disminuyen, la velocidad de calentamiento aumentará rápidamente, lo que traerá cambios significativos en el ciclo del agua (Arnbjerg-Nielsen, 2012).

En el ámbito nacional, de acuerdo con la información presentada por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), la temperatura media anual en México aumentó 0.85°C en los últimos 50 años (INECC, 2022), encontrándose en valores superiores al promedio mundial.

Las afectaciones del ciclo del agua debidas al cambio climático influirán en los patrones de precipitación, proyectando un incremento en las intensidades de diseño, las cuales se refieren a las intensidades de la lluvia durante un período de retorno definido utilizado en el diseño de las redes de drenaje urbano (Zhou, 2014). El cambio en las intensidades de diseño es altamente dependiente de la duración, del período de retorno y de la región examinada (Kourtis & Tsihrintzis, 2021).

De hecho, el cambio climático incrementa los riesgos de inundaciones, debido a que se pueden generar con mayor frecuencia y de mayor magnitud las precipitaciones, tal como ocurrió a inicios de septiembre de 2021 en México, suscitándose fenómenos hidrometeorológicos que fueron el detonante de las inundaciones ocurridas en la región del Valle del Mezquital.

La localización geográfica puede ser determinante en la probabilidad del aumento en las precipitaciones, llevando a un incremento en el riesgo de inundaciones repentinas causadas por lluvias extremas, inundaciones causadas por los ríos y las inundaciones de las regiones costeras (Arnbjerg-Nielsen, 2012). En este sentido, un gran número de estudios se han enfocado en modelar los impactos del cambio climático en diferentes tipos de inundaciones y a diferentes escalas alrededor del mundo (Kourtis & Tsihrintzis, 2021).

De acuerdo con el INECC (2022), los impactos del cambio climático registrados en México se relacionan con las afectaciones de los fenómenos hidrometeorológicos extremos de rápida aparición, como las lluvias o temperaturas intensas.

El riesgo de inundaciones también puede estar relacionado con aspectos socioeconómicos, sobre todo por el crecimiento de la población en zonas urbanas y semi-urbanas. En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas (2018) estima que 55% de la población mundial viven en zonas urbanas y semi-urbanas, y para 2030 proyecta un aumento al 60%, lo que representará que un tercio de la población mundial viva en ciudades con al menos 500 mil habitantes (UN, 2020).

Este crecimiento de la población en zonas urbanas ha traído como consecuencia problemas más grandes, ya que los servicios se tornan insuficientes, tal es el caso del alcantarillado. De hecho, debido a que estas zonas se vuelven más grandes, más densas e impermeables, las inundaciones son cada vez más frecuentes y devastadoras (Kang *et al.*, 2016). Alfieri y colaboradores (2016) previeron a la combinación de los cambios climáticos y socioeconómicos como probable causa del aumento del riesgo de inundaciones, especialmente en áreas urbanas.

En el ámbito nacional, la población ha crecido cerca del 30% en los últimos 20 años, de acuerdo con los datos del INEGI (2022) y tan sólo en CDMX habitan 7.31% de la población nacional, habiendo una densidad de población de 6163 hab/km², la cual contrasta con la media nacional (64 hab/km²) y con los estado de México (760 hab/km²), Morelos (404 hab/km²), Tlaxcala (336 hab/km²), Hidalgo (148 hab/km²) y Baja California Sur (11 hab/km²). Evidentemente, la densidad de población tiene fuertes implicaciones, sobre todo porque conlleva a una insuficiencia de los servicios, tal como ocurre en la CDMX, sobre todo en lo que respecta al sistema de alcantarillado.

3. Río Tula

3.1. Localización

La cuenca del río Tula es un sistema de flujo de agua que se extiende desde el Estado de México hasta la parte centro-sur del Estado de Hidalgo en México (Figura 2), incluye el Valle del

Mezquital que originalmente era una zona semiárida (Rubio-Franchini *et al.*, 2016).

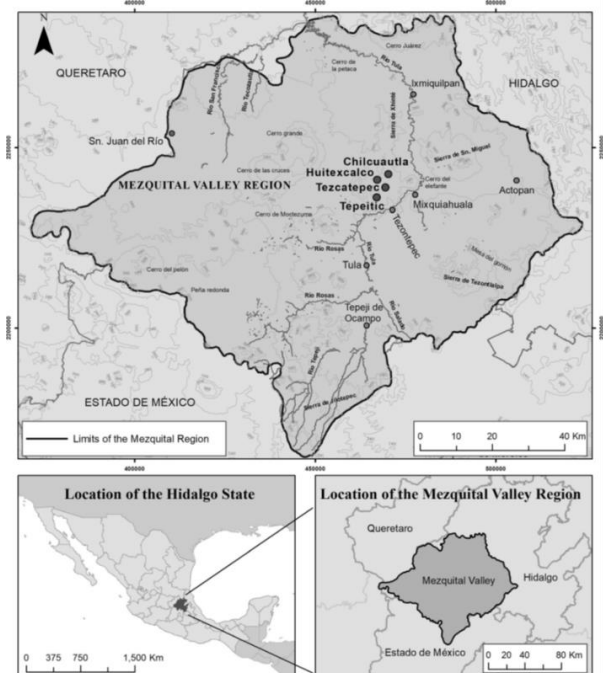


Figura 2: Ubicación del Río Tula y Valle del Mezquital. Fuente: Villalobos *et al.*, 2019.

El caudal del río Tula está controlado por presas construidas sobre el río y sus afluentes, como la Requena y la Endhó. Los principales afluentes que forman el río Tula son: Tepeji, el Salto, Tlautla, Rosas y el Salado. En su lugar más bajo, luego de pasar por los Valles de Ixmiquilpan y El Tasquillo, recibe otros importantes afluentes para formar el río Moctezuma, y más adelante el río Pánuco, para desembocar en el golfo de México (Ortiz & Ramírez, 2003).

3.2. Origen de las Aguas Residuales

El sistema hidrográfico en el Valle del Mezquital recibe aproximadamente 56.60 m³/s de agua residual proveniente de la Ciudad de México, siendo 94% de esta agua la que se utiliza en la irrigación de cultivos. La Figura 3 muestra el mapa del nacimiento del río Tula en las aguas negras de la Ciudad de México y del área metropolitana, convergiendo las aguas de los ríos Churubusco, Los Remedios y La Piedad. Todas estas corrientes contaminadas forman el gran canal hasta llegar a la Lumbreras y túneles profundos de Tequisquiapan del Estado de México.

El caudal de agua residual se envía al Valle del Mezquital por tres vías principales: Emisor Central, Emisor Poniente y Gran Canal. Durante su recorrido, se vierte en la laguna de Zumpango y en las presas Requena, Endhó, Rojo Gómez y Vicente Aguirre. De estos cuerpos de agua, una parte se deriva hacia canales de riego y se utiliza en la irrigación de cultivos agrícolas. El agua residual finalmente se drena por el río Tula hacia el río Moctezuma, y sigue su curso por el río Pánuco hasta desembocar en el Golfo de México, cerca de Tampico, Tamaulipas (Pérez *et al.*, 2019; INAFED, 2021).

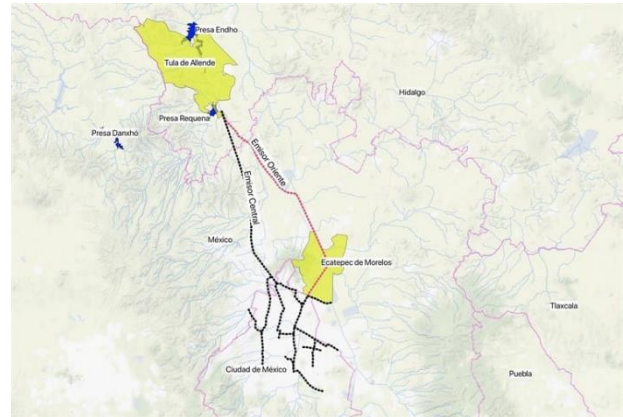


Figura 3: Mapa de la afluencia de aguas residuales superficiales al Valle del Mezquital. Fuente: Morales, 2021.

Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el río Tula es considerado el más contaminado de México debido al drenaje de la zona industrial de la ciudad de Tula, la zona metropolitana y la Ciudad de México.

Desde hace más de 100 años, este río ha recibido un importante volumen de aguas residuales de diferentes fuentes, principalmente textil, de refinería, de la industria hidroeléctrica y del cemento, además de aguas municipales que contienen altos volúmenes de heces fecales. El agua del río Tula se utiliza para el riego agrícola: pastos, cereales, árboles frutales y hortalizas, esta práctica representa un alto riesgo sanitario debido a los niveles de bacterias asociadas a las aguas residuales que contienen bacterias patógenas productoras de gases patógenos, como los coliformes, que viven en el tracto digestivo de los mamíferos (Ortiz & Ramírez, 2003).

3.3. Uso de Aguas Residuales para Riego Agrícola

El Valle del Mezquital representa un ecosistema particular ubicado al sureste del estado de Hidalgo, México. Esta zona es la más grande del mundo donde las aguas residuales no tratadas se han utilizado para el riego agrícola durante más de un siglo (Lesser *et al.*, 2018).

Estas aguas residuales se utilizan para el riego de alrededor de 900 km² de suelo agrícola (Guédron *et al.*, 2014). El clima es semiárido con una media anual de temperatura de 15 a 17 °C y una precipitación media anual de 400 a 600 mm (Castañeda *et al.*, 2020). Esta zona agrícola se dedica principalmente a la producción de cultivos como alfalfa, maíz, frijol, tomate, cebolla, pimiento verde, lechuga, rábano y betabel (Lesser *et al.*, 2018).

Si bien es cierto, el uso agrícola de las aguas residuales de la región del Valle del Mezquital no fue la causa directa del desbordamiento del Río Tula, ha permitido que durante varios años se realicen diversas investigaciones acerca de la calidad química y microbiológica de éstas, debido a que representan un factor de riesgo para la salud de la población, como consecuencia de las inundaciones (Siemens *et al.*, 2008).

En los últimos años, el conocimiento sobre las comunidades microbianas del suelo en las tierras secas ha aumentado a medida que participan en procesos críticos necesarios para mantener la calidad del suelo y el funcionamiento del ecosistema. Por ejemplo, los microbios del suelo son importantes para la descomposición de la materia orgánica y dependen de la calidad y cantidad de los residuos vegetales que se incorporan al suelo. También son responsables del ciclo de elementos esenciales, como el nitrógeno (N), el carbono (C), el fósforo (P) y el azufre (S), que se convierten en sus formas inorgánicas.

La estructura y diversidad de las comunidades microbianas del suelo depende de las características fisicoquímicas del suelo, como el pH, la humedad del suelo, el carbono orgánico y el contenido de nutrientes, los cuales están influenciados por parámetros ambientales, como el clima, el tipo de uso del suelo y la gestión (Lüneberg *et al.*, 2018).

Sin embargo, el cambio de uso de suelo con fines agrícolas en las zonas secas, como en muchos otros ecosistemas, modifica la cantidad y calidad de la materia orgánica, disminuyendo las reservas de carbono del suelo. Además, el uso de aguas residuales para el riego de cultivos modifica las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Aunque el riego con aguas residuales mejora particularmente la disponibilidad de carbono orgánico lábil y nutrientes en el suelo (N y P), esta práctica es perjudicial ya que agrega sales solubles, metales pesados, productos farmacéuticos y patógenos microbianos al suelo.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda el tratamiento de las aguas residuales utilizadas para el riego para reducir la concentración de patógenos y productos químicos o la restricción del riego con aguas residuales no tratadas o tratadas primariamente a cultivos no alimentarios, cultivos alimentarios que se procesan antes del consumo y alimentos que deben cocinarse. Sin embargo, el riego con aguas residuales no tratadas sigue siendo una práctica común en muchos países. De hecho, alrededor de 6 a 20 millones de hectáreas alrededor de tres de cada cuatro ciudades del mundo en vías de desarrollo utilizan aguas residuales no tratadas para el riego. En el Valle del Mezquital básicamente se utilizan tres calidades de agua diferentes para el riego: agua dulce, aguas residuales sin tratar, almacenadas en una presa durante al menos tres meses (presa Endhó) y aguas residuales sin tratar (directamente del río Tula) (Lüneberg *et al.*, 2018).

La zona sur del Valle del Mezquital se riega con aguas residuales que no han sido almacenadas en embalses, mientras que las aguas residuales utilizadas para riego en la región norte se han almacenado en las presas Requena y Endhó, donde solo reciben un tratamiento de sedimentación (Lesser *et al.*, 2018).

En esta región los análisis de comunidades microbianas han sido limitadas. Castañeda *et al.* (2020) determinaron la influencia del uso de agua residual en las comunidades bacterianas de agricultura de suelos del Valle del Mezquital, encontrando que a lo largo de los años ciertas cepas de bacterias se han beneficiado (Actinobacteria 27.4%, Proteobacteria 14.6% y Acidobacteria 14%), probablemente debido al suministro de materia orgánica a través de aguas residuales.

En las comunidades expuestas al uso de aguas residuales se ha reportado que las bacterias encontradas causan enfermedades gastrointestinales, teniendo una mayor prevalencia de diarrea (Contreras *et al.*, 2017). Asimismo, se ha detectado que casi el 50% del agua doméstica contiene contaminación fecal de hasta 4.62×10^4 UFC/100 mL (Vázquez *et al.*, 2020).

En un análisis del efecto de las aguas residuales en la cuenca del río Tula se encontró que los niveles de plomo en los músculos de la tilapia hacen que esta especie no sea segura para el consumo humano, y que metales como el arsénico, cadmio y plomo se bioacumulan en varias especies zooplanctónicas (Rubio-Franchini *et al.*, 2016).

Guedron y colaboradores (2014) realizaron un estudio de canales de aguas residuales anóxicas, en el que midieron altas concentraciones de especies metálicas, incluido el metilmercurio (3.8 ± 2.5 ng/L) y el plomo (0.16 ± 0.05 mg/L), los cuales son altamente tóxicos.

Un estudio reciente cuantificó el virus SARS-CoV-2 en ríos y canales de riego en el Valle del Mezquital, detectando el virus en

muestras de agua de ríos y aguas de canales de riego. En particular, las muestras mostraron una tendencia general consistente de tener las cargas virales más altas en los sitios más cercanos a la Ciudad de México (Coronado *et al.*, 2021). Este trabajo destaca la necesidad de mejorar las prácticas y políticas relacionadas con el uso de aguas residuales para riego en México y otros países.

Lüneberg *et al.* (2018, 2019), estudiaron la composición de la comunidad fúngica en los suelos, encontrando que la diversidad y riqueza de hongos fue mayor en los matorrales y menor en el suelo irrigado con aguas residuales. Además, identificaron fitopatógenos potencialmente dañinos que podrían representar un riesgo para la salud de los trabajadores agrícolas y consumidores de cultivos irrigados con aguas residuales. En particular, se encontraron gamma-proteobacterias, incluidos patógenos potenciales, como *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas* y *Acinetobacter* spp. (Broszat *et al.*, 2014).

Aunado a la carga bacteriana antes descrita, se tiene conocimiento de que el riego con aguas residuales libera productos farmacéuticos, bacterias patógenas y genes de resistencia, pero se sabe poco sobre la acumulación de estos contaminantes en el medio ambiente cuando se han aplicado aguas residuales durante décadas.

En el caso de los farmacéuticos se ha investigado la acumulación de ciprofloxacina, enrofloxacin, sulfametoxazol, trimetoprim, claritromicina, carbamazepina, bezafibrato, naproxeno, así como diclofenaco (Dalkmann *et al.*, 2012). En este estudio se encontró que el aumento de las concentraciones totales de antibióticos en el suelo no va acompañado de una mayor abundancia relativa de genes de resistencia; no obstante, el riego con aguas residuales aumenta la concentración absoluta de genes de resistencia en los suelos debido a un aumento a largo plazo de la biomasa microbiana total.

Díaz y Peña (2017) consideran que el río Tula puede ser una fuente potencialmente contaminada con productos farmacéuticos y de cuidado personal, tales como: ibuprofeno, 2-bencil-4-clorofenol, naproxeno, triclosán, ketoprofeno, diclofenaco, bisfenol A y residuos de estrona.

Con respecto a herbicidas que se han aplicado en el área al maíz y la alfalfa, para el control de malezas durante años, Müller *et al.* (2012) analizaron el efecto del riego con aguas residuales sobre el filtrado de atrazina, demostrando que el riego con aguas residuales disminuye la movilidad de la atrazina en los Phaeozems del Valle del Mezquital, al disminuir la conductividad hidráulica y aumentar la capacidad de sorción del suelo.

El uso de aguas residuales a largo plazo ha contribuido a la salinización y acumulación de metales pesados, productos farmacéuticos, bacterias, compuestos farmacéuticos y otros contaminantes en los suelos, así como a la contaminación química y bacteriológica de las aguas subterráneas en esta área (Lesser *et al.*, 2018).

3.4. Efecto de la Filtración de Agua Residual en el Acuífero

Se han realizado investigaciones limitadas sobre el impacto de las prácticas de riego en la calidad del agua subterránea en el Valle de Mezquital.

Lesser *et al.* (2018) reportaron que los altos niveles de bis-2-(etilhexil)-ftalato que se encuentran en varios pozos y manantiales pueden presentar efectos adversos para la salud humana, de acuerdo con normas de EE. UU. En esta investigación se hallaron compuestos farmacéuticos en las aguas residuales, como la metformina, la cafeína y el acetaminofén, representando casi el 60% de la concentración de estos compuestos en las aguas residuales analizadas. En el agua de manantial y agua subterránea detectaron compuestos farmacéuticos activos como

sulfametoxazol, N,N-dietil-meta-toluamida, carbamazepina y benzoilecgonina (metabolito primario de la cocaína), lo que sugiere que, aunque los suelos actúan como un filtro adsorbendo y degradando la mayor parte del contenido de contaminantes orgánicos en aguas residuales, estos compuestos todavía llegan al acuífero. Por tanto, su presencia, junto con los altos niveles del disruptor endocrino bis-2-(etilhexil) ftalato, indican que las fuentes de agua de la recarga de los acuíferos estudiados pueden suponer un riesgo para la salud del consumidor.

Otros productos de degradación de los compuestos analizados podrían llegar a los mantos acuíferos como es el caso de la guanilurea, N-4-acetilsulfametoxazol y epoxicarbamazepina. En este sentido, Guedron *et al.* (2014) detectaron que las concentraciones de As y Pb disueltos permanecieron de dos a cinco veces por encima de los umbrales para el agua potable, lo que destaca un riesgo potencial para la salud para aproximadamente 500.000 personas que utilizan las aguas subterráneas como suministro de agua.

Las investigaciones realizadas a las aguas residuales, así como el efecto en mantos acuíferos, recomiendan realizar estudios a profundidad, teniendo en cuenta los productos de degradación, antes de tomar decisiones sobre el uso de las fuentes de agua subterránea del Valle del Mezquital (Lesser *et al.*, 2018). Asimismo, se ha propuesto que las estrategias de manejo del agua deben incluir un plan de monitoreo de aguas subterráneas, así como regulaciones de riego de aguas residuales en el Valle de Mezquital (Marín *et al.*, 2019).

4. Desbordamiento del Río Tula y su Relación con el Sistema de Drenaje de la ZMVM

4.1. Sistema de Drenaje de la ZMVM

La ZMVM tiene una superficie de 7 866 km² e incluye 16 delegaciones de la Ciudad de México, 59 municipios del estado de México y 1 municipio en el estado de Hidalgo. En la Figura 4 se muestra un mapa de la ZMVM y sus colindancias con el estado de Hidalgo.

Por su parte, el sistema de drenaje de esta zona, y especialmente de la Ciudad de México, se relaciona directamente con el desbordamiento debido a que gran parte de sus aguas residuales desembocan en el río Tula (Figura 4). Para poder dimensionar esta situación es importante retomar algunos aspectos relacionados con el sistema de drenaje de la ZMVM.

Históricamente, el diseño del sistema de drenaje del Valle de México inició en la época virreinal, con la construcción de El Tajo de Nochistongo, que fue aprobado en 1607, con el fin de dar solución a los problemas que generaban las inundaciones en la Ciudad de México. El Tajo de Nochistongo presentó varios avances en su construcción, durante los cuales tuvo algunas reconstrucciones, entre las que se encuentra su modificación a cielo abierto para enviar el agua residual directamente hacia el río Tula, terminándose de construir en 1788 (Jiménez-Cisneros, 2011) y convirtiéndose en la primera salida artificial de la Ciudad de México.

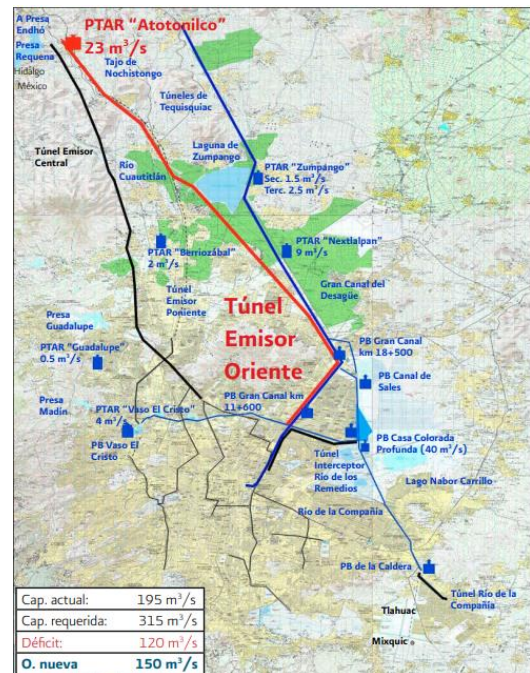


Figura 4: Sistemas de drenaje principal de la ZMVM. Fuente: SEMARNAT, 2010.

La Ciudad de México siguió creciendo demográficamente, y con ello los problemas para evitar las inundaciones. Fue así como en 1867 comenzó la construcción del Gran Canal de Desagüe como una alternativa para el sistema de drenaje, que finalizó a inicios del siglo XX (Hernández-Espinoza *et al.*, 2021).

El Gran Canal se convirtió con el paso del tiempo en una obra insuficiente, ya que se siguieron presentando dificultades para la salida de los escurrimientos pluviales. Por lo que, fue necesario la construcción de obras auxiliares para poder controlar las inundaciones de la Ciudad de México y permitir la descarga de las aguas residuales.

Entre las obras que se propusieron se encontró primeramente la construcción del Túnel Emisor Poniente (TEP) en 1962, el cual tiene una longitud de aproximadamente 15 km con una capacidad de descarga de 30 m³/s (Abedrop *et al.*, 2012).

Nuevamente, el crecimiento de la población, aunado al hundimiento de la Ciudad de México, llevó a la construcción del Túnel Emisor Central (TEC) para evitar las inundaciones, el cual significó un nuevo sistema de drenaje profundo y que se construyó entre 1967 y 1975 (Legorreta, 2006). El TEC permitió llevar el agua colectada del sistema de drenaje profundo fuera de la ciudad, iniciando en la delegación Gustavo A. Madero y finalizando en el río El Salto, el cual es afluente del río Tula. Los vertidos son almacenados en la presa Endhó, que es un cuerpo de agua regulador y distribuidor del agua de riego (Abedrop *et al.*, 2012).

La problemática del sistema de drenaje de la ZMVM continuó, de tal forma que, para dar solución a ésta, en 2008 se anunció la construcción de un nuevo sistema de drenaje profundo, el Túnel Emisor Oriente (TEO). Esta obra cuenta con un trayecto de 62 km y 7 m de diámetro, que permite una salida complementaria y alterna al TEC (SEMARNAT, 2010). El TEO inició su construcción en 2009, con una operación total en 2020 (Instituto de Ingeniería UNAM, 2021).

La trayectoria del TEO inicia en la alcaldía Gustavo A. Madero y descarga en el municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo, cerca de la salida del TEC. Cuenta con 25 lumbreras, algunas de ellas llegan a 150 m de profundidad, que se utilizan para ingresar maquinaria, material y el personal que se requiera para darle

mantenimiento. El objetivo de la construcción del TEO fue evitar inundaciones en caso de que llegara a colapsar el Gran Canal de Desagüe y dar mayor flexibilidad a la operación del sistema de drenaje del Valle de México para permitir el mantenimiento del drenaje profundo (Instituto de Ingeniería UNAM, 2021). En la Figura 4 se muestra un mapa con los sistemas de drenaje principal de la ZMVM.

4.2. Inundaciones del Río Tula

Durante el mes de septiembre de 2021 los habitantes de las regiones cercanas al río Tula sufrieron los estragos de su desbordamiento. El 6 de septiembre las precipitaciones causaron el primer evento, en el municipio de Tula, Hidalgo, en donde ocurrió el desbordamiento de los ríos Tula y Tepeji del Río, dejando un total de 16 fallecidos y cientos de damnificados. El Gobierno de México, a través de un comunicado informó que las personas fallecidas en el Hospital General de Zona No. 5 del IMSS en Tula, Hidalgo y el resto de los pacientes (más de 40) fueron evacuados por el personal del IMSS y de Protección Civil. Las comunidades afectadas por el desbordamiento del río Tula fueron: Rancho Chapultepec, Cruz Azul, El Chamizal, Dengui, San Marcos, La Malinche, Chamizal, 16 de Enero, Zona Centro y El Carmen, con datos preliminares de 2,000 viviendas afectadas (Presidencia de la República, 2021).

De acuerdo con medios de comunicación nacionales, el agua alcanzó una altura de hasta dos metros en algunas zonas (Azteca Noticias, 2021; El Universal, 2021). El 19 de septiembre de este mismo año, para evitar mayores daños, la CONAGUA alertó a la población de otro posible desbordamiento del río Tula, causado por el caudal alcanzado por el TEC y el TEO (CONAGUA, 2021).

Por su parte, CONAGUA mantuvo informada a la población indicando que los desbordamientos del río Tula fueron causados por las precipitaciones debidas a los fenómenos hidrometeorológicos; sin embargo, se ha puesto de manifiesto que parte de lo acontecido también está relacionado con el sistema de drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

En este sentido, varios medios internacionales siguieron de cerca la situación que se estaba viviendo en las zonas afectadas por los desbordamientos del río Tula, resaltando el análisis realizado por Chahim (2021) quien se ha dedicado a estudiar la problemática del drenaje de la ZMVM y quien considera que lo acontecido en el río Tula “No fue un “fenómeno natural”, como señalan las autoridades, ni un hecho aislado: fue un efecto predecible derivado de un manejo político del drenaje en el Valle de México, donde se ubica la Ciudad de México y su zona conurbada. Este manejo siempre ha privilegiado las zonas céntricas y de mayor plusvalía, mientras se han sacrificado las zonas periféricas y marginadas”.

Chahim (2021) considera que el desfogue combinado de la Presa Danxhó (50 m³/s) y la Presa Requena (120 m³/s), los cuales dan un total de 170 m³/s, no fue suficiente para desbordar el río, dado que éste tiene la capacidad de conducir 250 m³/s, siendo el verdadero causante del desbordamiento el torrente adicional (cerca de 220 m³/s) de aguas negras y pluviales del Valle de México enviadas por la CONAGUA y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) al Valle del Mezquital.

Para Chahim (2021), CONAGUA y SACMEX se enfrentan a un dilema de qué zona proteger de inundaciones, porque si bien es cierto, se pudo evitar el desbordamiento del río Tula, cerrando la mayoría de las compuertas del Drenaje Profundo, pero esto hubiera ocasionado una inundación en el Valle de México. Esto es lo que se considera como un manejo político de los sistemas de drenaje, en los que se toma la decisión proteger a la zona centro de la capital del país, a pesar de causar inundaciones en las zonas

más marginadas, ya sea del Valle de México, o del Valle del Mezquital.

Finalmente, lo ocurrido en septiembre de 2021 en el Valle del Mezquital, de alguna manera evidenció que la construcción del TEO no resolvió el problema de las inundaciones, sino que sólo lo trasladó de la ZMVM hacia el Valle del Mezquital.

5. Conclusiones

El desbordamiento del río Tula puso de manifiesto que no basta con construir sistemas de drenaje de mayor calibre, o ampliar el cauce de los ríos que reciben tanto las aguas residuales, como las pluviales. De hecho, se ha considerado que en la ZMVM haya mayor capacidad de retención de agua, y otra estrategia que se ha seguido en otras partes del mundo es disminuir el crecimiento de la metrópoli, con el fin de proteger y conservar las áreas verdes, lo que permitiría que disminuyera la velocidad de escurrimientos.

Lo ocurrido en el Valle del Mezquital también puso en la mira el problema de contaminación ambiental que ha permanecido durante años, causado por la irrigación de cultivos con aguas residuales provenientes de la ZMVM, las cuales en su mayoría no son tratadas y en las que se han encontrado agentes tóxicos, tanto químicos como microbiológicos.

Referencias

- Abedrop, L. S., Espinoza, V., Collado, J., Morales, J. M., & Hernández, J. (2012). El gran reto del agua en la Ciudad de México. Pasado, presente y prospectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. *Sistema de Aguas de la Ciudad de México*, Ciudad de México.
- Alfieri, L., Feyen, L., Di Baldassarre, G. (2016). Increasing flood risk under climate change: a pan-European assessment of the benefits of four adaptation strategies. *Climatic Change* 136, 507–521. DOI: 10.1007/s10584-016-1641-1.
- Ambjerg-Nielsen, K. (2012). Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. *Urban Water Journal*, 9, 57–65. DOI: 10.1080/1573062X.2011.630091
- Azteca Noticias. (7 de septiembre de 2021). Esto es lo que debes saber sobre el desbordamiento del Río Tula, que dejó inundaciones de hasta dos metros de altura. [Tweet] [Video adjunto]. Twitter. <https://twitter.com/AztecaNoticias/status/1435410809266458630?s=20>
- Broszat, M., Nacke, H., Blasi, R., Siebe, C., Huebner, J., Daniel, R., & Grohmann, E. (2014). Wastewater irrigation increases the abundance of potentially harmful *Gammaproteobacteria* in soils in Mezquital Valley, Mexico. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(17), 5282-5291. DOI: 10.1128/AEM.01295-14
- Castañeda-Cisneros, Y. E., Mercado-Flores, Y., Anducho-Reyes, M. A., Álvarez-Cervantes, J., Ponce-Lira, B., Evangelista-Martínez, Z., & Téllez-Jurado, A. (2020). Isolation and Selection of *Streptomyces* Species from Semi-arid Agricultural Soils and Their Potential as Producers of Xylanases and Cellulases. *Current Microbiology*, 77(11), 3460-3472. DOI: 10.1007/s00284-020-02160-7
- Centro Interdisciplinario de Biodiversidad y Ambiente, A. C. [CeIBA]. (2021). Canales y túneles emisores. Disponible en: <https://ceiba.org.mx/compendio-info-grafica-rhaxiii/>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2021). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México: Resumen ejecutivo 2020. Disponible en: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/455-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2020.PDF>
- Chahim, D. (20 de septiembre de 2021). Opinión: La tragedia de la inundación en Tula fue una decisión política. *The Washington Post*. <https://www.washingtonpost.com/es/post-opinion/2021/09/20/tula-inundaciones-rio-causas-hidalgo-mexico/>
- CONAGUA. (19 de septiembre de 2021). Debido al #Pronóstico de #Lluvias de fuertes a muy fuertes en la #CDMX, #EdoMéx y #Hidalgo durante las próximas 24 horas, la #Conagua mantiene monitoreo y vigilancia del posible incremento del río Tula y de las presas en la región. [Tweet]. Twitter. https://twitter.com/conagua_mx/status/1439675523479834625?s=20.

- Contreras, J. D., Meza, R., Siebe, C., Rodríguez-Dozal, S., López-Vidal, Y. A., Castillo-Rojas, G., & Eisenberg, J. N. (2017). Health risks from exposure to untreated wastewater used for irrigation in the Mezquital Valley, Mexico: a 25-year update. *Water Research*, 123, 834-850. DOI: 10.1016/j.watres.2017.06.058
- Coronado, Y. I., Navarro, R., Mosqueda, C., Valenzuela, V., Pérez, J. P., González-Mendoza, V., & Rocha, J. (2021). SARS-CoV-2 in wastewater from Mexico City used for irrigation in the Mezquital Valley: quantification and modeling of geographic dispersion. *Environmental Management*, 68(4), 580-590. DOI: 10.1007/s00267-021-01516-4
- Dalkmann, P., Broszat, M., Siebe, C., Willaschek, E., Sakinc, T., Huebner, J., ... & Siemens, J. (2012). Accumulation of pharmaceuticals, Enterococcus, and resistance genes in soils irrigated with wastewater for zero to 100 years in central Mexico.
- Díaz, A., & Peña-Alvarez, A. (2017). A simple method for the simultaneous determination of pharmaceuticals and personal care products in river sediment by ultrasound-assisted extraction followed by solid-phase microextraction coupled with gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatographic Science*, 55(9), 946-953. DOI: 10.1093/chromsci/bmx058
- El Universal. (7 de septiembre de 2021). El desbordamiento del Río #Tula dejó inundaciones de hasta dos metros en negocios y casas; se activó el Plan DN-III #Video: Especial. [Tweet] [Video adjunto]. Twitter. https://twitter.com/El_Universal_Mx/status/1435278692901588995?s=20
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 2069–2094. DOI: 10.1007/s10311-020-01059-w
- Gran-Castro, J. A., & Ramos, D. R. S. L. (2019). Climate change and flood risk: vulnerability assessment in an urban poor community in Mexico. *Environment and Urbanization*, 31(1), 75–92. DOI: 10.1177/0956247819827850
- Guédrón, S., Duwig, C., Prado, B. L., Point, D., Flores, M. G., & Siebe, C. (2014). (Methyl) mercury, arsenic, and lead contamination of the world's largest wastewater irrigation system: the Mezquital Valley (Hidalgo State—Mexico). *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(8), 1-19. <https://link.gale.com/apps/doc/A384098009/AONE?u=anon-75bf289b&sid=googleScholar&xid=e188fd66>
- Hernández-Espinosa, A. K., Otaño-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D., & Romo-Gómez, C. (2021). El Sistema de drenaje de la Ciudad de México. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 9(17), 24–30. DOI: 10.29057/icbi.v9i17.7146
- INAFED, Tula de Allende (2021). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM13hidalgo/municipios/13076a.html>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). Primera Comunicación sobre la Adaptación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Pp. 217. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/717678/138_2022_Primera_Comunicacion.pdf
- Instituto de Ingeniería UNAM. (2021). Túnel Emisor Oriente: una alternativa para mitigar el riesgo de inundaciones en la ZMVM. México. Disponible en: <http://www.ii.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyecto/Paginas/TunelEmisorOriente.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Sistemas de consulta. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/siscon/>
- Izazola, H. (2001). Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 47, 285-320. DOI: 10.24201/edu.v16i2.1121
- Jiménez-Cisneros, B. (2011). Suministro y desalojo del agua de la Ciudad de México: de los aztecas al siglo XXI. *Revista Digital Universitaria*, 12, 1-17. <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num10/art96/index.html>
- Kang, N., Kim, S., Kim, Y., Noh, H., Hong, S.J., Kim, H.S. (2016). Urban drainage system improvement for climate change adaptation. *Water (Switzerland)* 8. DOI: 10.3390/w8070268.
- Kourtis, I. M., & Tsihrintzis, V. A. (2021). Adaptation of urban drainage networks to climate change: A review. *Science of The Total Environment*, 771, 145431. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145431
- Legorreta, J. (2006). El agua y la Ciudad de México de Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Ciudad de México.
- Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mähknecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios-Piña, H. (2018). Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198, 510-521. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.01.154
- Lüneberg, K., Schneider, D., Siebe, C., & Daniel, R. (2018). Drylands soil bacterial community is affected by land use change and different irrigation practices in the Mezquital Valley, Mexico. *Scientific Reports*, 8(1), 1-15. DOI: 10.1038/s41598-018-19743-x
- Marín Celestino, A. E., Ramos Leal, J. A., Martínez Cruz, D. A., Tuxpan Vargas, J., De Lara Bashulto, J., & Morán Ramírez, J. (2019). Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality, using multivariate statistical approaches and water quality index in a wastewater irrigated region. *Water*, 11(8), 1702. DOI: 10.3390/w11081702
- Morales, E. (10 de septiembre de 2021). ¿Por qué las lluvias del Valle de México afectan a Tula y provocan inundaciones? La silla rota Hidalgo. <https://hidalgo.lasillarota.com/estados/por-que-las-lluvias-del-valle-de-mexico-afectan-a-tula-y-provocan-inundaciones/559130>
- Müller, K., Duwig, C., Prado, B., Siebe, C., Hidalgo, C., & Etchevers, J. (2012). Impact of long-term wastewater irrigation on sorption and transport of atrazine in Mexican agricultural soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 47(1), 30-41. DOI: 10.1080/03601234.2012.606416
- Ortiz-Gallarza, S. M., & Ramírez-López, J. A. (2003). Water Quality Of The Tula River Related To The Petroleum Refining Industry: Accumulation Factors And Treatments. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 65.
- Pérez-Díaz, J. P., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, E. I., Can-Chulim, Á., & Mancilla-Villa, O. R. (2019). Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo. *Acta universitaria*, 29. DOI: 10.15174/au.2019.2117.
- Presidencia de la República. (7 de septiembre de 2021). Gobierno de México informa acciones de apoyo a la población afectada por inundaciones en Hidalgo. México. Disponible en: <https://www.gob.mx/presidencia/prensa/gobierno-de-mexico-informa-acciones-de-apoyo-a-la-poblacion-afectada-por-inundaciones-en-hidalgo>
- Rubio-Franchini, I., López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M. G., & Rico-Martínez, R. (2016). Bioaccumulation of metals arsenic, cadmium, and lead in zooplankton and fishes from the Tula River Watershed, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(1), 1-12. DOI: 10.1007/s11270-015-2702-1
- SEMARNAT. (2010). El Túnel Emisor Oriente duplicará la capacidad del drenaje profundo del Valle de México. México.
- Siemens, J., Huschek, G., Siebe, C., & Kaupenjohann, M. (2008). Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City—Mezquital Valley. *Water Research*, 42(8-9), 2124-2134.
- Sistema Meteorológico Nacional. (2021). Ciclones tropicales, información histórica. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2018). World Urbanization Prospects 2018. Available from www.un.org/development/desa/pd/themes/urbanization.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2020). Policies on spatial distribution and urbanization have broad impacts on sustainable development in urban areas is projected to grow from 26 per cent. Available from https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undes_pd_2020_popfacts_urbanization_policies.pdf.
- Vázquez-Salvador, N., Silva-Magaña, M. A., Tapia-Palacios, M. A., Mora-López, M., Félix-Arellano, E., Rodríguez-Dozál, S., ... & Mazari-Hiriart, M. (2020). Household water quality in areas irrigated with wastewater in the Mezquital Valley, Mexico. *Journal of Water and Health*, 18(6), 1098-1109. DOI: 10.2166/wh.2020.095
- Villalobos, J. M. L., García, V. V., Trejo, E. O., McCall, M. K., Hernández, J. H., & Sinha, G. (2019). Mapping from spatial meaning: bridging Hñahñu (Otomi) ecological knowledge and geo-information tools. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 15(1), 1-11. DOI: 10.1186/s13002-019-0329-9
- Zhou, Q. (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water (Switzerland)* 6, 976–992. DOI: 10.3390/w6040976.