

MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DEL MANEJO DE LAS AGUAS PLUVIALES URBANAS EN LA PARTE ALTA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS, GUADALAJARA, JALISCO

Hydrological and Hydraulic Modeling of the Management of Urban Rainwater in the Upper Part of the San Juan de Dios River Sub-basin, Guadalajara, Jalisco

ESMERALDA BERENICE MENDOZA GONZÁLEZ

SERGIO ESTEBAN ALDANA ALONSO

CARLOS CASTOLO RAMÍREZ

Universidad de Guadalajara

Fecha de recepción: 21 de agosto de 2017. Fecha de aceptación: 03 de octubre de 2017.

RESUMEN

El manejo de las aguas pluviales urbanas en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios se lleva a cabo a partir de una planeación insustentable del ciclo hidrológico y del funcionamiento del sistema hidráulico urbano. Por tal motivo, el objetivo del presente artículo es comparar mediante una modelación hidrológica e hidráulica el comportamiento de las aguas pluviales en condiciones urbanas actuales y en condiciones de restauración hidrológica, para evaluar los impactos o beneficios que cada condición genere en la subcuenca de estudio. La investigación presentada ha evolucionado desde el año 2011 con el enfoque de restauración del ciclo hidrológico de cuencas urbanas. Para ello se considera la utilización del *software* Storm Water Management Model 5.1 (SWMM 5.1) para realizar la modelación hidrológica e hidráulica de las aguas pluviales en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios, Jalisco, México. Según la modelación, se consiguió la restauración parcial del ciclo hidrológico mediante la implementación de tecnologías LID y la optimización del funcionamiento de la infraestructura hidráulica, considerando una precipitación de 72 mm en cuatro

horas. Los resultados se visualizan al analizar el comportamiento del vaso regulador El Deán, el cual, bajo las condiciones actuales urbanas, sufre un desborde significativo provocado por los fuertes escurrimientos pluviales urbanos e inundaciones en la zona de estudio. Por otro lado, en un escenario en condiciones hidrológicas restauradas el vaso El Deán se mantiene estable.

Palabras claves: Ciclo hidrológico, subcuenca, manejo de aguas pluviales, EPA-SWMM.

ABSTRACT

Urban storm water in the upstream of San Juan de Dios River Sub-basin is managed in an unsustainable planning of the natural water cycle and the urban water system's performance. For this reason, this article aims, through a hydrological and hydraulic simulation, to make a comparison of storm water's behavior under the current urban conditions and under a hydrological restored scenario. This is done with the purpose of evaluating the impacts and benefits implied in each modeled scenario. This research has evolved since 2011 with an urban hydrological restoration point of view. The Storm Water Management

Model 5.1 (SWMM 5.1) is used for the hydrological and hydraulic modeling of storm water runoff in the upstream of San Juan de Dios River Sub-basin in Jalisco, México. According to this simulation, partial restoration of hydrological cycle was achieved through the implementation of LID technologies and the optimization of the urban water system performance, considering a 72 mm precipitation in a period of four hours. Results are visualized by analyzing the behavior of “El Deán” Storage Unit, which under the current urban conditions has suffered a significant outflow caused by the high storm water runoff and floods in the zone of study. In the other hand, under restored hydrological conditions, “El Deán” Storage Unit remains stable.

Key words: water cycle, basin, storm water management, EPA-SWMM.

INTRODUCCIÓN

La parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios está ubicada en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México, y es aquí donde se presenta el deterioro ambiental más fuerte de la ciudad, debido a que la superficie de áreas verdes es de 1.1% (CA604 UDG, 2013) y la superficie de suelo urbano impermeable es de 89% (Mendoza, 2013). Además, vale resaltar que el venero de El Deán está contaminado (Sustaita, 2002). Esto provoca alteraciones en las variables de infiltración, evapotranspiración y escurrimiento del ciclo hidrológico. Por otra parte, el ciclo hidráulico urbano para suministrar los servicios de agua potable, alcantarillado y pluvial en la subcuenca se da de una manera aislada y tradicional. En el caso del suministro, se sigue abasteciendo a la población de la subcuenca del acueducto Chapala-Guadalajara (CEA Jalisco, s.f.); el servicio de alcantarillado y el pluvial es combinado, obsoleto e incompatible con el entorno urbano, lo que se refleja en el colapso de la infraestructura pluvial.

Las alteraciones en la infiltración, evapotranspiración y el escurrimiento que se han presentado en el ciclo hidrológico y la implementación de

un ciclo hidráulico urbano asilado y tradicional han traído en común el problema de las inundaciones en la subcuenca de estudio. Es por ello que se realiza una modelación hidrológica e hidráulica del manejo de las aguas pluviales en condiciones actuales y en condiciones de restauración hidrológica de cuencas con el *software* Modelo de Aguas Pluviales, versión 5.1 de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés SWMM 5.1-EPA), para evaluar el comportamiento de la variable de escurrimiento a partir de un enfoque tradicional y con un enfoque sustentable. Cabe mencionar que el SWMM 5.1 es un *software* que es ampliamente utilizado y es mejorado constantemente desde los finales de los años sesenta. Así se constituye como una herramienta adecuada para el complejo análisis y evaluación del funcionamiento de sistemas de drenaje urbano (Urich y Rauch, 2014).

El enfoque sustentable al que se refiere el presente artículo busca conseguir la restauración hidrológica de la subcuenca en estudio y considera para ello los siguientes conceptos de referencia: la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Vargas y Márin, 2016, cit. en Paz, 2007; CAP-NET y GWP, 2005; Andrade, 2004), la Gestión Urbana Sustentable del Agua (GDRC, 2008), la Ciudad Sensible al Agua (IWA, 2012), el Diseño Urbano Sensible al Agua (Philip, 2011; Ingeniería Sanitaria y Ambiental, s.f.), la Gestión Integral de Aguas Pluviales (Morote y Hernández, 2017; Philip, 2011) y la Modelación Hidrológica e Hidráulica con el *software* SWMM 5.1 (EPA, 2015; Leskens, Brugnach y Hoekstra, 2014; Urich y Rauch, 2014), cada uno de estos enfoques interviene en la sustentabilidad del manejo del recurso hídrico en cuencas urbanas.

La modelación hidrológica e hidráulica en la parte alta de la subcuenca del río de San Juan de Dios es un tema que los autores han trabajado de manera independiente o conjunta desde el año 2013 hasta mediado del año 2017. Primero se realizó en 2013 una tesis de licenciatura por parte de la Universidad de Guadalajara titulada: “Manejo Integral de las aguas pluviales como medida

de mitigación de las inundaciones en las zonas urbanas: el caso de la parte alta de la subcuenca de San Juan de Dios”; se utilizó el *software* SWMM-EPA y parámetros de sustentabilidad para la mitigación de inundaciones (Mendoza, 2013). Después, la Universidad de Twente y el Instituto de Investigaciones Tecnológicas del Agua Arturo Gleason Santana, A. C. (IITAAC) en el año 2014 continuaron la investigación titulada: “Storm Water Management In Guadalajara”; el objetivo de este estudio era validar y mejorar la modelación hidrológica e hidráulica de la tesis de licenciatura mencionada (Poppema, 2014). Por último, se realizó un informe con el *software* de modelación XP-solution para el análisis del proyecto ejecutivo del vaso regulador El Deán (02 en junio de 2017) por el IITAAC; en dicho informe se analiza de manera general la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios para conocer las afectaciones que el proyecto ejecutivo del vaso regulador trae a sus zonas aledañas (IITAAC, 2017). Con la participación que han tenido los autores en cada investigación mencionada, el presente artículo considera la base de datos de cada una para actualizar la presente investigación en el manejo de aguas pluviales en la subcuenca de estudio.

MARCO CONCEPTUAL

GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO

El enfoque de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) está basado en la administración y desarrollo de los mismos de una manera equilibrada y sustentable, donde el interés debe abarcar al sector económico, social y ambiental. Este enfoque se visualiza desde lo local a lo internacional, para establecer una buena gobernabilidad a través de leyes y políticas, con la finalidad de que se logren acuerdos normativos e institucionales de una manera sustentable y equilibrada.

Para la gestión y la coordinación en los recursos hídricos que son utilizados en el sector alimenticio, la industria, la naturaleza y la población, se deben buscar alternativas que proporcionen un beneficio mutuo, donde no se afecte de

manera negativa la función de otro (CAP-NET y GWP, 2005). La coordinación entre estos sectores permite relacionar las necesidades humanas y la de los ecosistemas para “reconocer la función ecológica del agua como fuente de vida y sobrevivencia de todas las especies y ecosistemas que dependen de ella” (Vargas y Márin, 2016, cit. en Paz, 2007).

Sin embargo, la GIRH tiene algunas limitaciones que radican en la débil percepción que el público en general y los tomadores de decisiones tienen sobre los problemas que pueden presentarse a largo plazo en el deterioro ambiental, debido a la posible omisión de diagnósticos existentes a corto, mediano y largo plazo (Andrade, 2004).

GESTIÓN URBANA SUSTENTABLE DEL AGUA

Los autores Rivera y Aguilar (2015), en un estudio realizado en Zacatecas- Guadalupe, México, mencionan que la gestión del agua urbana se ha llevado a cabo de manera no sustentable e ineficiente, por ejemplo: la extracción del agua ha ocasionado la sobreexplotación de los acuíferos, y en la distribución del agua se localizan fugas en las tuberías. Determinar estos problemas son resultado de la interacción de factores ambientales, sociales, económicos y administrativos.

De acuerdo con lo anterior, la Gestión Sustentable de Agua de Lluvia (GUSA, por sus siglas en inglés) aporta una solución para contrarrestar la problemática mencionada, debido a que es “un proceso de participación, planeación e implantación basado en la ciencia, que ayuda a los tomadores de decisiones a determinar cómo satisfacer las necesidades de agua de la sociedad en el largo plazo, manteniendo servicios ecológicos esenciales y beneficios económicos” (GDRC, 2008).

Por lo tanto, el GDRC (2008)¹ establece que este tipo de gestión de aguas urbanas tiene componentes que le dan forma y guían su aplicación, como es el caso del componente para optimizar el suministro. Este puede conseguirse a partir de la implementación de la Captación de agua de

1. El Centro de Investigación de Desarrollo Global (Global Development Research Center).

lluvia, para aprovechar los volúmenes de lluvia y disminuir la demanda de agua suministrada por las redes de distribución.

CIUDAD SENSIBLE AL AGUA

La Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas inglés) en 2012 concluyó que, a partir de diversas investigaciones, el agua juega un rol importante en el desarrollo de las ciudades para que sean habitables, sustentables y productivas, ante los problemas que se afrontarán en el futuro. Por lo anterior, la IWA estableció las características y directrices de una ciudad sensible al agua (CSA) en doce principales principios. En los principios se establece que una ciudad del futuro sensible al agua tendrá que garantizar los servicios de agua potable y sanidad para la población que aumentará en número y comunidades. Para garantizar estos servicios, la ciudad del futuro se asentará de manera compacta y contará con infraestructura sustentable que integre y guarde armonía con el medio ambiente natural (IWA, 2012).

La manera que propone la IWA para alcanzar los objetivos de la ciudad del futuro, en un inicio, es proporcionar valor a los recursos hídricos. Los principios señalan que el buen manejo del ciclo del agua provocará que la comunidad sea sustentable y tienda a conformar una ciudad verde. Con este enfoque se establece que todo tipo de agua, ya sea residual o sanitaria, tiene un valor y se puede emplear en algún uso particular, es decir, no es necesariamente desechable.

La aplicación de los valores del agua se realiza primeramente en el involucramiento de la comunidad con los recursos hídricos. Esto se logrará brindando y educando a la ciudadanía de información útil y precisa, la cual se obtendrá de realizar mediciones de las variables del ciclo del agua. Mediante la transmisión de dicha información, la población será soberana frente al costo ambiental y social, realizando y fomentando prácticas sustentables de manera individual y de manera activa en la toma de decisiones respecto a los recursos hídricos.

Por último, bajo el enfoque de los principios de la ciudad sensible al agua, deben implementarse

diversos tipos de sistemas sustentables para el manejo del agua, que será el resultado de la colaboración en conjunto de la ciudadanía, de los organismos públicos y de los organismos privados en la planeación urbana (IWA, 2012).

DISEÑO URBANO SENSIBLE AL AGUA

“El Diseño Urbano Sensible al Agua [DUSA] tiene como objetivo integrar la gestión del agua urbana, en particular las aguas pluviales, a un diseño urbano más moderno incluyendo la planificación del paisaje” (Philip, 2011).

Para realizar la DUSA se requiere seguir un conjunto de principios, entre ellos: llevar la gestión del agua urbana más cerca al ciclo natural del agua; proporcionar un beneficio ornamental donde sea posible, ser compatibles con las características y la cultura de la zona; y tener la flexibilidad para adaptarse a un futuro incierto (Ingeniería Sanitaria y Ambiental, s.f.).

De acuerdo con Ingeniería Sanitaria y Ambiental (s.f.), con la DUSA se lograrán disminuir los flujos de escorrentía y la contaminación de las descargas de agua contaminadas, mediante la recogida, tratamiento y aprovechamiento de las escorrentías. También se podrá disminuir la demanda de agua potable proveniente del sistema de suministro de agua. Además, se reducirá el agua que entra al sistema de drenaje sanitario y se evitarán desbordamientos de sistemas unitarios, altamente contaminados.

GESTIÓN INTEGRAL DE AGUAS PLUVIALES

El enfoque tradicional que se utiliza para gestionar las aguas pluviales de la ciudad se basa en desalojar las aguas pluviales a través de canales superficiales y un drenaje a base de tuberías, y a su vez es mediante un sistema de drenaje combinado, donde las aguas pluviales se mezclan con las aguas de descarga doméstica e industriales.

El enfoque sustentable, por su parte, trata de integrar al sector social, económico y ambiental a partir de soluciones para reducir el impacto negativo que llegan a ocasionar en un dado momento las aguas pluviales en las áreas urbanas (Philip, 2011). La Gestión Integral de Aguas Pluvi-

ales permite minimizar el riesgo de inundaciones en zonas vulnerables y reducir el nivel de contaminación del drenaje urbano superficial, por mencionar algunos (Morote y Hernández, 2017).

MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA CON EL SOFTWARE SWMM 5.1

Los modelos de simulación hídrica son programas computacionales que pueden representar los fenómenos físicos relacionados en la gestión del agua, tal como la relación lluvia-escurrimiento, flujo por superficies, drenaje y flujo en sistemas de alcantarillado. Estos modelos permiten a los tomadores de decisiones el diagnóstico de eventos de lluvia extremos, así como la identificación y el dimensionamiento de alternativas de solución. Las modelaciones están basadas en ecuaciones físicas, características de un área determinada (por ejemplo, elevación y rugosidad), y fuerzas externas (tales como los eventos torrenciales) (Leskens, Brugnach y Hoekstra, 2014)

El software SWMM 5.1 es una herramienta computacional que permite simular el comportamiento de los escurrimientos pluviales dividiendo el área de estudio en pequeñas microcuencas homogéneas, que cuentan con sus propios parámetros hidrológicos, tales como precipitación-variable a través del tiempo, área, pendiente, parámetros de permeabilidad, almacenamiento en depresión, entre otros. Además el SWMM 5.1 permite definir las características hidráulicas de la red hidrosanitaria, lo que se traduce en el análisis del flujo de agua a través de conducciones abiertas y cerradas con variedad de geometrías, modelado de elementos especiales (ejemplo: las unidades de almacenamiento). Lo anterior deriva en la posibilidad de modelar el comportamiento hidrodinámico de las aguas pluviales en la zona. Adicionalmente, con el SWMM 5.1 es posible evaluar el funcionamiento de las tecnologías sustentables de bajo impacto denominadas LID, por sus siglas en inglés. (EPA, 2015)

La US-EPA era y sigue siendo un protagonista en el desarrollo de métodos numéricos en la

modelación de sistemas de drenajes urbanos. La US-EPA desarrolló la herramienta SWMM en 1969 y la dio a conocer por primera vez en 1971. El software SWMM evaluaba el desempeño hidráulico de los sistemas de drenaje urbano (basado en las ecuaciones de Saint Venant), permitiendo el complejo y óptimo diseño de dichos sistemas. El SWMM es aún utilizado ampliamente y sigue desarrollándose –la última versión integral tecnologías LID– y se continúa mejorando la velocidad computacional (Urich y Rauch, 2014).

Alrededor del mundo, la herramienta computacional SWMM de la EPA ha sido utilizada en numerosos proyectos académicos y profesionales. Se identifican en los Estados Unidos trabajos publicados en la revista científica que aborda temas de hidrología llamada *Journal of Hydrologic Engineering*, en la cual (Bezerra E., 2017) (Kourtis I.M., 2017) se han documentado trabajos de modelación de tecnologías LID. Entre ellas se encuentra la modelación de barriles y jardines de lluvia (Abi Aad, Suidan y Shuster, 2010) y la simulación del desempeño de pavimentos permeables en cuencas urbanas (Zhang Guo, 2015). En Brasil se han publicado análisis de los efectos de la urbanización en términos de aguas pluviales mediante la utilización del SWMM (Da Silva, Costa, Silva y Koide, 2017). En Grecia se presentaron este año, en la 15 CEST (Conference on Environmental Science and Technology), trabajos de modelación de aguas pluviales mediante el programa implementado en el presente trabajo de investigación (Kourtis, Kopsiaftis, Bellos y Tsihrantzis, 2017). Por último, se han identificado en China simulaciones de escurrimientos pluviales urbanos basados en el EPA-SWMM (Jiang, Chen y Wang, 2014).

En México, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ha publicado proyectos de ingeniería hidráulica, cuya metodología de análisis se apoya en el SWMM. Tal es el caso de la generación del Plan Integral del Manejo e las Aguas Pluviales en Chetumal (IMTA, 2013).

ANÁLISIS DEL MANEJO DE LAS AGUAS PLUVIALES URBANAS

UBICACIÓN

La parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios se localiza en la ciudad de Guadalajara en el estado de Jalisco. Hidrográficamente se ubica en la región VIII del país, en la cuenca Lerma-Santiago-Pacífico; en el Área Metropolitana de Guadalajara, en el valle de Atemajac; y de esta última, en la cuenca del río San Juan de Dios (figura 1).

La subcuenca de estudio tiene una superficie de 1,865.24 hectáreas y limita al norte aproximadamente con la calzada Lázaro Cárdenas, al este con las vías del ferrocarril, al sur con los cerros del Cuatro y Santa María, y al oeste con la avenida Colón (CA604 UDG, 2013) (figura 2).

DATOS DEL MEDIO FÍSICO NATURAL

- La altura máxima sobre el nivel medio del mar es de 1,870 metros y una mínima de 1,550 metros (figura 2).
- La inclinación del terreno o la pendiente es de 0 a 5% (partes bajas y medias de la subcuenca) y de 5% el 60% (partes altas de la subcuenca) (figura 2, los límites de las partes bajas, medias y altas se señalan con línea discontinua amarilla).

- El suelo está conformado por regosol eutrico, lo que significa que el contenido de agua en él es mayor a 50% en los 20 a 50 cm de profundidad (INEGI, 2011).
- Los escurrimientos pluviales tienen una dirección predominante de sur a norte, y de poniente a oriente.
- El clima predominante en el valle de Atemajac tiene una precipitación media anual de 897 mm, una intensidad de lluvia promedio de 51 mm/hr, una temperatura máxima promedio de 27°C, una media promedio de 20.6°C y una mínima promedio de 11°C (Gleason, 2016).
- Gleason (2014) documenta la distribución del agua de acuerdo con cada una de las variables del ciclo hidrológico en condiciones naturales y después de la urbanización. Del total del agua precipitada, en un escenario propuesto con condiciones naturales, se estima 40% de evapotranspiración, 10% de escurrimiento, 25% de infiltración somera y 25% de infiltración profunda. En ese mismo escenario, pero en condiciones urbanizadas donde se ha impermeabilizado en 75-100%, la superficie presenta una modificación significativa en el comportamiento de las variables del ciclo hidrológico, provocando la dismi-

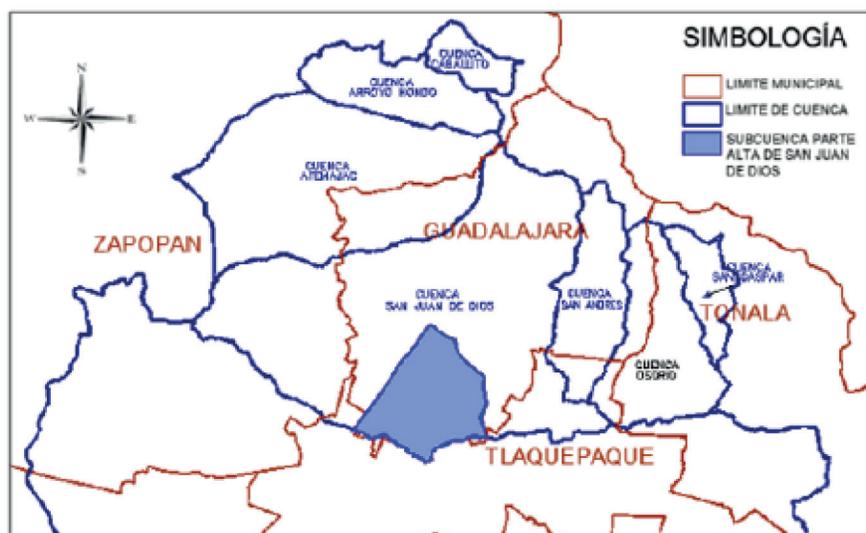


FIGURA 1. Ubicación de la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios. Fuente: Mendoza, 2012.

nución a 30% de evapotranspiración, el aumento a 55% de escurrimiento y únicamente 10% de infiltración somera y 5% de infiltración profunda. Al considerar los porcentajes de carácter teórico y conceptual anteriores, así como la precipitación media anual de 897 mm, se puede realizar un análisis de cómo se distribuyen las variables del ciclo del agua en la cuenca de estudio, la cual cuenta con una superficie de 1,865.24 hectáreas. Dicho análisis se presenta en la tabla 1, donde se aprecian los resultados de multiplicar el área por la precipitación mencionada y aplicando el porcentaje descrito, dependiendo de la variable en cuestión.

El análisis anterior permite evaluar de manera general el cambio de las variables del ciclo del agua en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios. Se puede apreciar que la evaporación se reduce en 133%; el escurrimiento se incrementa 550%; la infiltración somera se reduce 255% y la infiltración profunda sufre un decremento de 500%.

- La subcuenca se asienta en el acuífero de Atemajac. El acuífero se encuentra sobreexplotado con un déficit de -20.46 millones de m³ (CEA, 2009).

TABLA 1. Distribución de las variables del ciclo del agua en la parte alta de la subcuenca del río de San Juan de Dios

Variable del ciclo del agua	Volumen en escenario natural (m ³)	Volumen en escenario urbanizado (m ³)
Evaporación	6,692,481.12	5,019,360.84
Escurrimiento	1,673,120.28	9,202,161.54
Infiltración somera	4,182,800.70	1,673,120.28
Infiltración profunda	4,182,800.70	836,560.1

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Las aguas subterráneas del acuífero de Atemajac, según sean las condiciones topográficas y geomorfológicas del suelo, pueden brotar en forma de manantiales sobre la superficie del terreno. En la subcuenca se han identificado manantiales en las colonias Balcones del Cuatro y El Deán. El flujo que aportan los manantiales es desperdiciado, debido a que su destino es la infraestructura hidrosanitaria urbana, combinándose con aguas negras y pluviales contaminadas.

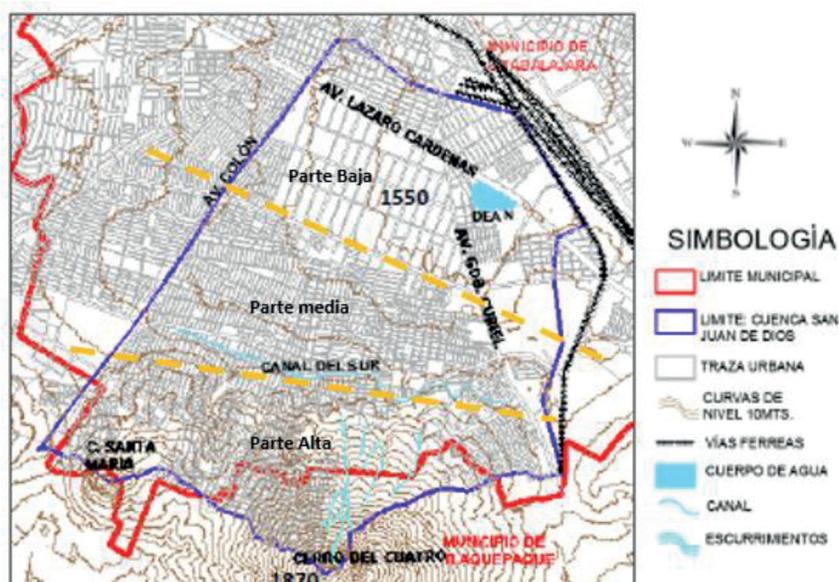


FIGURA 2. Delimitación de parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios. Fuente: Mendoza, 2012.

- Algunas características del acuífero de Atemajac han sido publicadas en el *Diario Oficial de la Federación* por la Comisión Nacional del Agua por medio de la *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Atemajac (1401), Estado de Jalisco* (CONAGUA, 2015). Dichas características se enuncian a continuación:
 - Se ubica en la región hidrológico-administrativa Lerma-Santiago-Pacífico.
 - Tiene una extensión superficial aproximada de 736.45 km².
 - La precipitación media anual de 989.3 mm.
 - La evaporación media anual se considera de 2,130 mm.
 - Cuenta con una estratigrafía caracterizada por las siguientes unidades estratigráficas: Unidad La Laja, compuesta por rocas basálticas con un espesor de 50 m; Unidad El Cuatro, compuesta por basaltos andesitas, ceniza y brechas de edad plioleistocénica, formando la cadena volcánica sur de Guadalajara. Unidad Jalisco, con tobas de caída libre, tobas líticas, vítreas, lapilli e ignimbritas. Cuenta con un espesor promedio de 200 m, son de permeabilidad alta y forman un acuífero libre. Depósitos de pie de monte, compuestos por roca, grava y arenas de granulometría variada; Suelos residuales, con espesor promedio de 0.4 m.
 - En cuanto a la geohidrología del acuífero de Atemajac se destacan los depósitos residuales que rellenan el valle y las tobas de la Unidad Jalisco, los que por su alta permeabilidad, extensión y espesor forman el acuífero más importante de la región; la lluvia es la recarga más importante del acuífero; el agua subterránea circula con un sentido general de poniente a oriente, con un gradiente hidráulico uniforme; las descargas principales se dan por bombeo de pozos; las fronteras impermeables son constituidas por el cordón montañoso El Madroño y el cerro del Cuatro.
- Para el acuífero Atemajac se han realizado pruebas de bombeo por el método de Jacob, donde se ha determinado un coeficiente de almacenamiento de 0.13, siendo el dato presentado con mayor frecuencia. Los valores del coeficiente de almacenamiento pueden variar desde 0.08 hasta 0.22.
- Tiene una recarga media anual calculada de 147.3 millones de metros cúbicos; tiene un volumen anual concesionado de 132.69 millones de metros cúbicos y un volumen anual de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos de 159.7 millones de metros cúbicos. No cuenta con disponibilidad media anual, ya que tiene un déficit anual de -11.09 millones de metros cúbicos.
- En la figura 3, se aprecia la delimitación del acuífero Atemajac. En color azul, los niveles estáticos registrados en 1990 y la dirección de los flujos subterráneos en flechas negras.
- Dadas las condiciones del acuífero Atemajac documentadas es de gran importancia la búsqueda de soluciones que apunten hacia el incremento de la recarga media anual, con el fin de garantizar la disponibilidad de agua subterránea para las futuras generaciones. Por ello se proponen medidas de restauración hidrológica en el presente artículo, tales como recarga acuífera, aumento de masa forestal, captación de agua de lluvia y obras de regulación de avenidas de agua que mitiguen parcialmente las inundaciones (Gleason, 2016a).
- La Ley de Aguas Nacionales señala que la disponibilidad media anual de los acuíferos se revisará cada tres años (CONAGUA, 2015). Para tener datos más precisos que permitan modelar de mejor forma, se puede apuntar en un futuro próximo hacia la consecución de un equipo de

monitoreo en tiempo real de las aguas subterráneas. Esto facilitaría tener un panorama claro del estado actual de las aguas subterráneas (Gleason, 2016a).

Cuando la urbanización ocurre en áreas donde el agua subterránea juega un rol clave en el funcionamiento hidrológico y ecosistémico, el entendimiento de las interacciones dinámicas entre precipitación, contenido de agua en suelos, vegetación y las construcciones en el entorno, resulta crítico (Arden, Ma y Brown, 2014).

DATOS GENERALES DE LA URBANIZACIÓN

- El material de las vialidades es de asfalto, cemento y empedrado (CA604 UDG, 2013).
- De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), se requieren como mínimo 9 m² por habitante (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.) para el desarrollo urbano sustentable (SINIA, 2016). En la subcuenca el porcentaje es de tan solo 1.1% por habitante, provocado por la deforestación y el incre-

mento de la mancha urbana de concreto (CA604 UDG, 2013).

- El 89% de la superficie de la subcuenca es impermeable (Mendoza, 2013), debido a la presencia de cemento o asfalto en vialidades y edificaciones.
- Los escurrimientos superficiales que fluyen por las vialidades no disponen de protocolos que eviten el transporte de contaminantes tales como partículas en suspensión, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, plomo, zinc, cadmio, cobre, cromo, contaminantes orgánicos persistentes (Cops) entre otras (bacterias totales (BT), bacterias colifecales (BCF), nitrógeno (N), fósforo (P) (Álvarez, 1996; ASCE-WEF, 1992; Ellis y Hvited-Jacobsen, 1996; Gutiérrez, 1992; UDFCD, 1992; y Zafra, Temprano y Tejero, 2007).

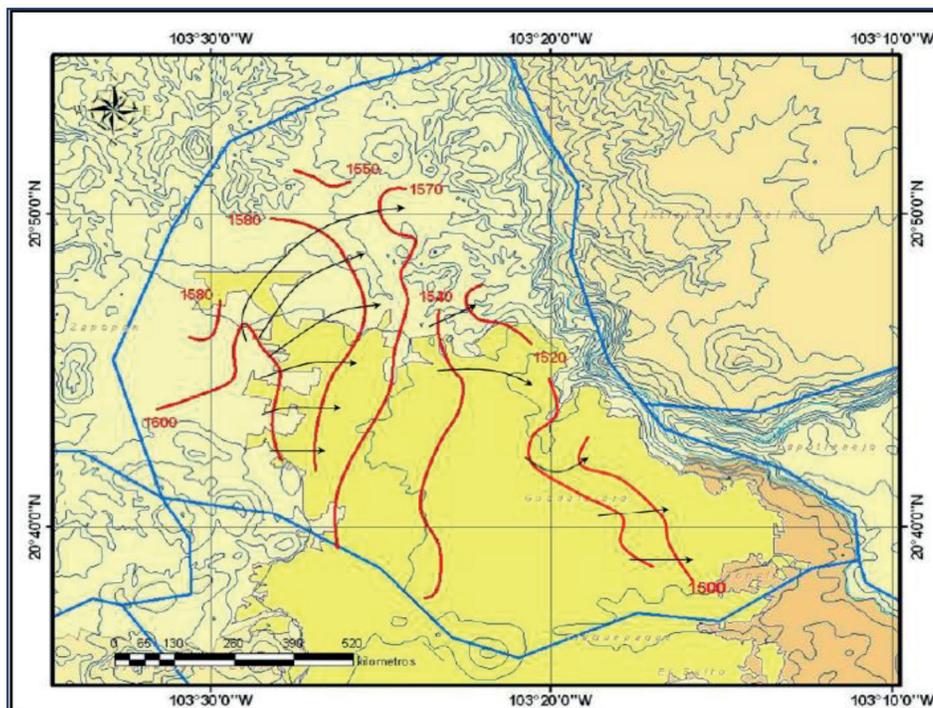


FIGURA 3. Elevación de los niveles estáticos del acuífero Atemajac en 1990 y dirección de flujo subterráneo. Fuente: CONAGUA, 2015.

DATOS DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA URBANA

- El Canal del Sur no cuenta con las estrategias suficientes para su mantenimiento (figura 4).
- Existe infraestructura de retención y almacenamiento de aguas pluviales en las partes alta y media de la subcuenca. El bordo del Cuatro, con capacidad de almacenamiento de 14,446 m³, está ubicado en la parte alta al suroeste de la zona de estudio. Existen también algunas zonas de retención con capacidad de 25,000 m³, en la parte alta de la zona de estudio. El vaso regulador 5 de Mayo, con capacidad de almacenamiento de 48,337 m³, se encuentra ubicado al inicio de la parte media de la zona de estudio, cerca del punto de descarga del canal del sur. En la parte baja, en el punto de descarga de la subcuenca, se encuentra también el vaso regulador El Deán con una capacidad actual de 247,535 m³ (SIAPA, 2017).
- Los drenajes pluviales y sanitarios son combinados.
- Algunos colectores presentan flujos mayores a su capacidad de conducción, lo que compromete su funcionamiento.

PROBLEMÁTICA DEL MANEJO DE AGUAS PLUVIALES URBANAS

La existencia del agua dependerá del cuidado con el que se manejen las variables de evaporación, evapotranspiración, precipitación, infiltración y escorrentía de su ciclo hidrológico en el planeta. Si este ciclo es alterado por una planeación urbana insustentable del agua traerá como consecuencias alteración, degradación o incluso la pérdida de los ecosistemas.

Hablar del manejo de aguas pluviales en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) es hablar de inundaciones. El control de inundaciones es un reto global e históricamente considerado. El desarrollo en áreas de inundación incrementa los daños económicos y pone en riesgo la salud y seguridad de los habitantes. La mayoría de las ciudades se ubican cerca de cuerpos de agua dado los numerosos beneficios y servicios, así como el acceso a recursos, energía y transporte (Porse, 2014).

Tal es el caso del asentamiento de la ciudad de Guadalajara. El primer asentamiento de la ciudad de Guadalajara se ubicó al margen poniente del río San Juan de Dios, ubicado en el Valle de Atemajac (Gleason, 2016). El río San Juan de Dios



FIGURA 4. Contaminación del canal del Sur, Guadalajara. Fuente: NTR. Meléndez, 2016.

fue entubado durante el mandato de Miguel Ahumada, con el objetivo de evitar enfermedades. En vez de restaurar el río, se optó por cubrirlo y con ello afectar al ciclo del agua, ya que provocó el mezclar las aguas negras con el agua de lluvia (Gleason, 2016). Hoy el colector San Juan de Dios está en condiciones deplorables (Gleason y Córdova, 2014). Durante fuertes eventos de lluvia los drenajes no pueden hacer frente a la gran cantidad de agua y drenarlas hacia los ríos receptores por medio de un sistema de alcantarillado combinado. (Vleeschauwer, Weustenraad, Nolf, Wolfs, Meulder, Shannon y Willems, 2014)

En la subcuenca de estudio se ha realizado una planeación urbana insustentable del agua, debido a que las variables de su ciclo hidrológico han sido alteradas y degradadas por el déficit de áreas verdes, la impermeabilización de la superficie, la falta de recarga de los acuíferos, la contaminación de las aguas y el desperdicio del agua (como se ha mencionado en los datos del medio físico natural).

Lo anterior ocurre por la falta de consideración al ciclo del agua en la planeación urbana y por el funcionamiento tradicional del sistema hidráulico urbano; este último consiste en captar (pozos, cuerpos de agua), conducir (tubería), potabilizar (planta potabilizadora), almacenar (tanques), abastecer (red hidráulica: industria, vivienda y municipio), desalojar (alcantarillado) y tratar (planta de tratamiento) las aguas generadas por su población.

El manejo de las aguas pluviales en la subcuenca de estudio busca únicamente disminuir las inundaciones, sin considerar las demás consecuencias que sufren el ciclo natural del agua y el sistema artificial de la subcuenca. Entonces, para disminuir las inundaciones, las alternativas del gobierno local radican en regular y desalojar las aguas pluviales, en implementar nuevos colectores y en ampliar y construir vasos reguladores en las partes altas, medias y bajas. El alcance de estas propuestas es limitado a la mitigación de inundaciones en un corto plazo. Sin embargo, actores sociales relacionados con proyectos hidráulicos en otras localidades de México han considerado

los proyectos como un reto a largo plazo que no esté limitado a una política gubernamental, a un periodo de elecciones o a un cargo político temporal (Casiano, Ozerol y Bressers, 2017)

El manejo de aguas pluviales en la subcuenca de estudio actualmente se hace desde un punto de vista tradicional. Este comprende la mitigación de inundaciones, mediante la implementación de obras hidráulicas que regulan y desalojan de manera casi inmediata el volumen de agua escurrido. En este artículo se considera el manejo sustentable de las aguas pluviales a partir de estrategias de restauración del ciclo natural del agua, mediante la modelación hidrológica e hidráulica de cuencas urbanas.

HACIA UN MANEJO SUSTENTABLE DE AGUAS PLUVIALES URBANAS

La modelación hidrológica e hidráulica que se realiza en la subcuenca de estudio se consigue a partir de alternativas tanto sustentables (tecnologías *Low Impact Development*, LID) como tradicionales, dadas las características naturales y urbanas de la misma. Para el manejo sustentable del agua pluvial se propone lo siguiente: un enfoque a corto, mediano y a largo plazo; la reforestación en cada microcuenca (ver trazo de microcuenca en la figura 9); la implementación de 144 unidades de tecnologías LID distribuidas en las 56 microcuencas delimitadas en la zona de estudio. Entre dichas tecnologías se encuentran los pavimentos permeables, trincheras filtrantes y barriles de lluvia como tecnologías de carácter sustentable. En cuanto al manejo tradicional del agua pluvial se propone la implementación de obras de regulación en la parte alta, media y baja de la subcuenca de estudio; cabe mencionar que estas regulaciones no exceden un volumen a 10,000 m³/s.

Las tecnologías LID se determinaron adecuadas para modelar el escenario en condiciones restauradas, ya que han sido reconocidas y han ganado terreno en materia de gestión de aguas pluviales para el manejo integrado por cuencas que proveen retenciones naturales, tratamiento y preservación de los recursos hídricos (Huang, Li,

Niu, Zhou, 2014). En el SWMM 5.1 se pueden definir los parámetros de las tecnologías LID, que se dividen en tres capas: capa superficial, capa de suelo o pavimento y capa de almacenamiento (Huang, Li, Niu, Zhou, 2014). Cada una de ellas cuenta con distintas capacidades de almacenamiento, conductividades hidráulicas, tasas de drenaje (Huang, Li, Niu, Zhou, 2014). Por ejemplo, en la figura 5 se muestran los pavimentos permeables, la cual requiere la definición de parámetros de suelo, almacenamiento, drenaje, superficie y pavimento. Estos se definen en la función *LID Control Editor* (EPA, 2015). Asimismo, se definen los parámetros para los barriles de lluvia que serán utilizados en

el modelo en escenario con condiciones restauradas (figura 6). Finalmente, se agrega lo necesario para las trincheras filtrantes utilizadas en el modelo, tal y como se representa en la figura 7.

Con el manejo sustentable de las aguas pluviales se pretende no solo disminuir las inundaciones, sino también evitar que el agua se siga desperdiciando (captación de agua de lluvia con la implementación de barriles) y sobreexplotando (recarga de acuíferos por el incremento en la infiltración), para conseguir la restauración del ciclo hidrológico y mejorar el sistema hidráulico urbano en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios.

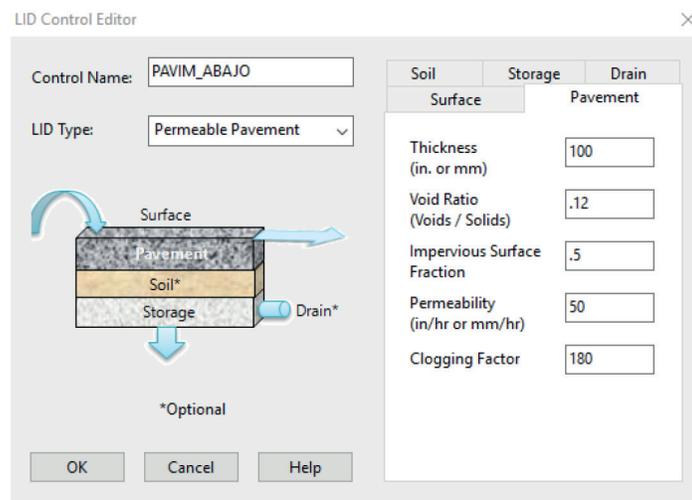


FIGURA 5. Definición de parámetros de los pavimentos permeables. Fuente: EPA, 2015.

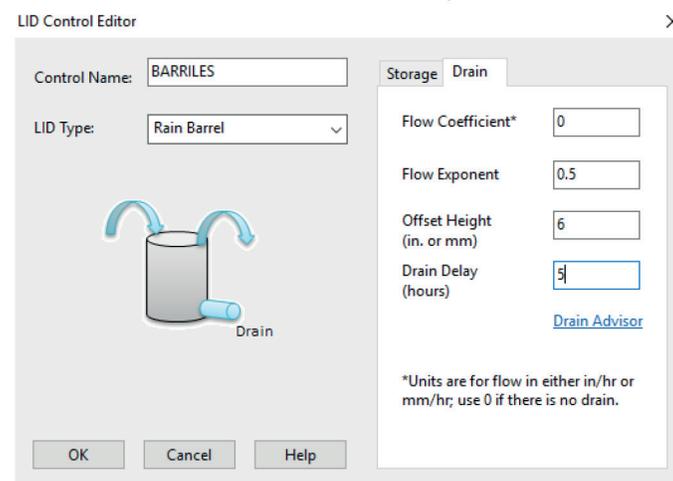


FIGURA 6. Definición de parámetros de los barriles de lluvia. Fuente: EPA, 2015.

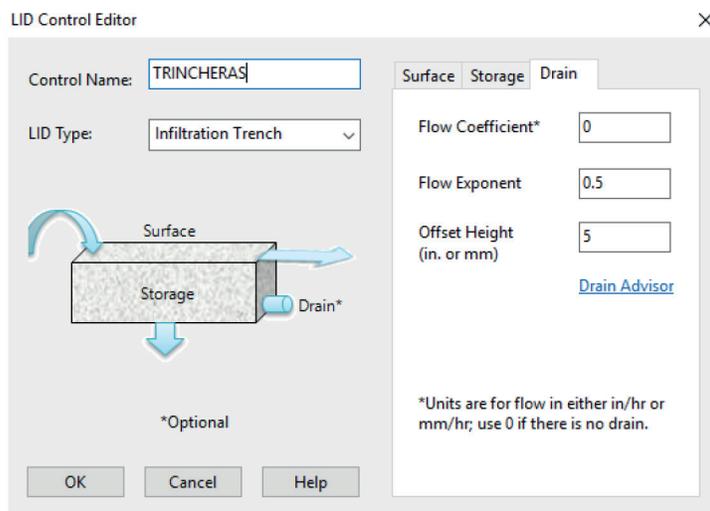


FIGURA 7. Definición de parámetros de las trincheras filtrantes.
Fuente: EPA, 2015.

METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

La comparación hidrológica e hidráulica de los escurrimientos pluviales se realizó mediante la herramienta de modelación numérica computacional por el método del Modelo de Aguas Pluviales, versión 5.1 de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés SWMM 5.1-EPA). En esta metodología se definen, primeramente, los parámetros hidrológicos y geomorfológicos de las condiciones físicas actuales de la subcuenca de estudio. Dicha información construye el modelo hidrológico e hidráulico en formato unidimensional. Se ejecuta mediante el programa SWMM 5.1 para obtener el comportamiento de los escurrimientos pluviales en el escenario actual. Después se analiza la zona de estudio y se construye un modelo en el que se integran propuestas con un enfoque de restauración hidrológica en cuencas urbanas. Los resultados se comparan y se llegan a conclusiones. En la figura 8 se muestra el cuadro conceptual que describe la metodología aplicada.

ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Para el análisis hidrológico se utilizó la información de los mapas de isoyetas de intensidad de lluvia del estado de Jalisco de la Secretaría de

Comunicaciones y Transportes (SCT). Con esta información se obtuvo un hietograma de diseño de una tormenta de cuatro horas para un periodo de retorno de diez años.

El *software* utilizado en este estudio es unidimensional, es decir, considera los flujos de agua en vectores de una sola dirección. Para visualizar más a detalle la distribución de los escurrimientos pluviales urbanos, se deberá considerar la utilización de una herramienta computacional con más parámetros que permita modelar de manera bidimensional. Así, sería posible generar mapas precisos de inundación que muestren zonas afectadas a través del tiempo, según el modelo.

Otra limitación que habría que aclarar es que el total de agua que se modela en este trabajo es únicamente la que proviene de la lluvia de diseño, es decir, no se contemplan las descargas de aguas residuales a la infraestructura hidrosanitaria urbana. Investigaciones futuras pueden apuntar hacia su consideración, con el objetivo de modelar de manera más precisa la cantidad y calidad de agua pluvial combinada con residual que fluye a través de las tuberías, ya que se trata de un sistema hidrosanitario combinado.

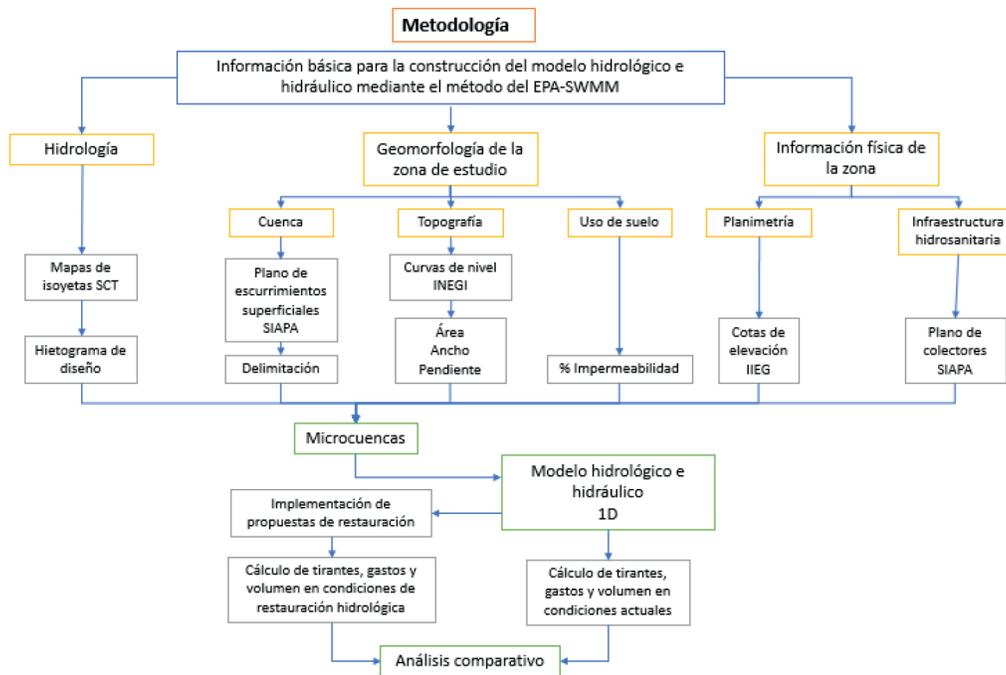


FIGURA 8. Cuadro de metodología. Fuente: Elaboración propia, basado en Llaguno *et al.*, 2016.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN FÍSICA ACTUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

El análisis de la información física se refiere a la recopilación de las características de la infraestructura hidrosanitaria de la zona de estudio con el objetivo de generar el modelo hidráulico en formato unidimensional. La conformación y características de la red de los colectores y de la infraestructura de retención se obtuvieron de la información disponible en los planos del Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). Por su parte, las cotas de elevación de los pozos de visita se obtuvieron a partir de puntos de elevación en la intersección de las vialidades del Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (IIEG). Con esta información se definen los nodos y conductos del modelo hidráulico 1D.

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DE LAS MICROCUENCAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Se realiza el análisis geomorfológico de la zona de estudio con el objetivo de generar y definir las propiedades de las microcuencas con las que

se construye el modelo hidrológico e hidráulico. Este análisis se divide en tres partes: delimitar las microcuencas, obtener las características topográficas y definir las características del suelo.

Las microcuencas se delimitaron según la cuenca de aportación de los nodos del modelo hidráulico 1D previamente definidos, a partir del plano de los flujos de escurrimientos superficial de SIAPA. Una vez delimitada cada microcuenca, se definen las características topográficas de cada una utilizando las curvas de nivel a cada diez metros del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Para calcular el área, ancho de cuencas y pendiente de Taylor-Schwartz, se empleó una herramienta computacional para analizar sistemas de información geográfica. Por último, con las cartas de uso de suelo del INEGI se calculó el porcentaje de impermeabilidad de cada microcuenca. En la figura 9, se muestra una representación de las 1,865.24 hectáreas delimitadas por 56 microcuencas y la infraestructura hidrosanitaria que permite el drenaje de las aguas pluviales.



FIGURA 9. Microcuencas e infraestructura hidrosanitaria urbana en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios. Fuente: Elaboración propia, con el SWMM 5.1.

La delimitación de las microcuencas se llevó a cabo considerando la configuración topográfica de la zona de estudio que permitieron definir parteaguas naturales. Además, se cuenta con parteaguas artificiales conformados por la infraestructura, lo cual también definieron la delimitación de las microcuencas hidrológicas.

CONSTRUCCIÓN Y EJECUCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN CONDICIONES ACTUALES

El modelo hidrológico e hidráulico unidimensional se construye con las microcuencas previamente definidas y se ejecuta con el programa de modelación SWMM 5.1. Las propiedades de cada microcuenca simulan los caudales con el método hidrológico de escurrimiento no lineal. Estos interactúan con la infraestructura del modelo y simulan su comportamiento hidráulico mediante las ecuaciones de continuidad de Saint Venant. El programa calcula los tirantes, caudales y volúmenes del modelo.

IMPLEMENTACIÓN DE PROPUESTAS CON ENFOQUE DE RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO EN EL MODELO NUMÉRICO

Se analizan las condiciones topográficas y edafológicas de la zona de estudio y se realizan propuestas con un enfoque de restauración hidrológica en cuencas urbanas. Estas tienen como característica favorecer la retención e infiltración de escurrimientos pluviales y se dividen en dos tipos: propuestas sustentables y propuestas tradicionales.

Las propuestas sustentables comprenden el incremento de la masa forestal y ecotecnologías como pavimentos permeables, trincheras filtrantes y captación de agua de lluvia con barriles de lluvia. El programa SWMM 5.1 tiene la capacidad de modelar infraestructura de bajo impacto. Las propuestas tradicionales están conformadas por la ampliación de zonas de regulación y por la integración de pequeños vasos reguladores en las partes medias y bajas de la subcuenca de estudio. Las alternativas de restauración se incluyen en el modelo hidrológico e hidráulico en condiciones actuales y se ejecuta la simulación.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Se tabulan los resultados de ambas modelaciones para comparar el comportamiento de los escurrimientos pluviales urbanos en los dos escenarios analizados en condiciones urbanas actuales y en condiciones de restauración hidrológica.

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

CONFIGURACIÓN DE DATOS TÉCNICOS DEL PROGRAMA SWMM 5.1

En la modelación se describen parámetros hidrológicos e hidráulicos tales como hietograma de diseño, delimitación, área, porcentaje de impermeabilidad, dirección de flujo, nodos, ancho, coeficiente de rugosidad para áreas permeables e impermeables, pendiente, tasa máxima y mínima de infiltración, así como almacenamiento en depresiones en zonas impermeables y permeables en cada una de las 56 microcuencas que conforman la subcuenca de estudio.

Para configurar la infraestructura se colocaron nodos, los cuales reciben el agua escurrida de las microcuencas. A cada uno de los nodos se les especificó una elevación (msnm) y una profundidad (m). A la conexión de los nodos se les añaden colectores con características específicas: nodo inicial y final, geometría de la sección, altura de sección o diámetro, longitud, rugosidad y coeficiente de pérdida de energía en la entrada, salida y a lo largo del conducto.

Para las unidades de almacenamiento, se han definido las siguientes características: elevación, profundidad inicial y máxima, una curva área-capacidad.

En el caso de las tecnologías sustentables aplicadas en la modelación se consideró lo siguiente: en pavimentos permeables se definieron parámetros de superficie, capa de pavimento, capa de suelo, capacidad de almacenamiento y drenaje; en los barriles de lluvia se establecieron capacidad de almacenamiento y drenaje; por último, en las trincheras filtrantes, se especificaron las

condiciones de superficie, almacenamiento y drenaje.

La interfaz del SWMM 5.1 permite definir los parámetros para el adecuado funcionamiento de las tecnologías LID. Se definirán dichos parámetros para el uso de pavimentos permeables, jardines de lluvia y trincheras filtrantes.

Las capas que componen a los pavimentos permeables son suelo, almacenamiento, drenaje y superficie. Para cada capa, se coloca una serie de parámetros. Para este caso de estudio se definen tal y como se presenta en la tabla 2. Las capas que componen a los barriles de lluvia son únicamente de almacenamiento y drenaje, y se exponen en la tabla 3. Las trincheras filtrantes, por su parte, cuentan con las capas de superficie, almacenamiento y drenaje; su definición se observa en la tabla 4.

TABLA 2. Parámetros de pavimentos permeables en la subcuenca de estudio

Suelo	Valor
Grosor (mm)	900
Porosidad (fracción volumétrica)	0.43
Capacidad de terreno (fracción volumétrica)	0.105
Punto de capilaridad (fracción volumétrica)	0.047
Conductividad (mm/hr)	1.18
Pendiente de conductividad	5
Succión capilar (mm)	3.5
Almacenamiento	Valor
Grosor (mm)	100
Vacíos/sólidos	0.5
Periodo de infiltración (mm/hr)	20
Factor de taponamiento	180
Drenaje	Valor
Coeficiente de flujo	0.5
Exponente de flujo	0.5
Altura de salida (mm)	6
Superficie	Valor
Altura de berma (mm)	0
Fracción de vegetación	0
Rugosidad de Manning	0.1
Pendiente de superficie (%)	0.5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

TABLA 3. Parámetros de barriles de lluvia en la subcuenca de estudio

Almacenamiento	Valor
Altura (mm)	1000
Drenaje	Valor
Coefficiente de flujo	0
Exponente de flujo	0.5
Altura de salida (mm)	6
Retardo por retención (Hr)	5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

TABLA 4. Parámetros de trincheras filtrantes en la subcuenca de estudio

Superficie	Valor
Altura de berma (mm)	0
Fracción de vegetación	0
Rugosidad de Manning	0.1
Pendiente de superficie (%)	1
Almacenamiento	Valor
Grosor (mm)	600
Vacíos/sólidos	0.5
Periodo de infiltración (mm/hr)	20
Factor de taponamiento	180
Drenaje	Valor
Coefficiente de flujo	0
Exponente de flujo	0.5
Altura de salida (mm)	5
Altura de salida (mm)	5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Una vez definidos los parámetros anteriores, que dictan las propiedades hidrológicas e hidráulicas de las tecnologías LID, es posible simular su comportamiento.

RESUMEN DE REPORTES DEL PROGRAMA SWMM 5.1

El programa SWMM 5.1 permite reportar resultados hidrológicos e hidráulicos concretos a partir de una simulación dinámica unidimensional (1D). A continuación, se muestran los resultados hidrológicos (escurrimiento e infiltración en mm) de la simulación realizada en toda la subcuenca de estudio en condiciones actuales urbanas (ta-

bla 5) y en condiciones urbanas de restauración (tabla 6).

TABLA 5. Resultados hidrológicos en condiciones urbanas actuales

Precipitación total (m ³)	Escurrimiento total (m ³)	Infiltración total (m ³)	Estancamientos y pérdida por fricción
1'342,971	1'257,930	68,482.78	16,558.22

Fuente: Elaboración propia, 2017.

TABLA 6. Resultados hidrológicos en condiciones urbanas de restauración

Precipitación total (m ³)	Escurrimiento total (m ³)	Infiltración total (m ³)	Estancamientos, pérdida por fricción y tecnologías sustentables
1'342,971	683,130	362,702	297,139

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De acuerdo con los resultados de las tablas 5 y 6, se concluye lo siguiente:

- Al considerar estrategias de restauración para el ciclo natural del agua se disminuye el escurrimiento y, a la vez, se propicia un incremento en la infiltración.
- Más de una quinta parte de las aguas pluviales pueden ser reguladas por tecnologías sustentables y por el aumento de masa forestal.
- Al disminuir el escurrimiento e incrementar la infiltración no solo se mitigan inundaciones, sino también se aporta agua al acuífero de Atemajac.
- Con menos agua fluyendo por las vialidades, tras la propuesta de restauración, se exige menos al funcionamiento de la infraestructura hidrosanitaria tradicional existente.
- Con la utilización de tecnologías sustentables en espacios públicos y domésticos, no solo

se pretende impactar de manera positiva en las variables del ciclo del agua y del sistema hidráulico urbano, sino también se busca contar con el aprendizaje y la participación de la población para la conservación y aprovechamiento sostenible del agua.

En el caso de los resultados hidráulicos, se presenta el comportamiento de un vaso regulador. Para ello, se tomó como referencia la infraestructura que presenta un mayor impacto en la subcuenca de estudio: el vaso regulador El Deán, ubicado en el parque Liberación, en la parte baja nororiente de la subcuenca. Los resultados hidráulicos del vaso regulador se presentan en condiciones urbanas actuales en la tabla 7 y en condiciones urbanas restauradas en la tabla 8, que consideran la capacidad del vaso (m^3), el volumen máximo (m^3), la pregunta clave de si se desborda o no, así como el volumen de inundación (m^3).

TABLA 7. Resultados hidráulicos en condiciones urbanas del vaso regulador El Deán

Capacidad del vaso (m^3)	Volumen máx. (m^3)	¿Se desborda? Sí o No	Volumen de inundación (m^3)
247,535	517,614	Sí	270,079

Fuente: Elaboración propia, 2017.

TABLA 8. Resultados hidráulicos en condiciones urbanas restauradas del vaso regulador El Deán

Capacidad del vaso (m^3)	Volumen máx. (m^3)	¿Se desborda? Sí o No	Volumen de inundación (m^3)
247,535	240,273	No	0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De acuerdo con los resultados de las tablas 7 y 8, se concluye lo siguiente:

- En condiciones urbanas actuales se calcula que el vaso regulador El Deán está rebasado en 209%. Lo anterior significa que le llega

más volumen de agua del que puede regular, lo que provoca inundaciones con un volumen de 270,079 m^3 en las zonas aledañas al vaso.

- Al considerar un escenario urbano restaurado que busque equilibrar las variables del ciclo hidrológico e implementar obras de regulación estratégicamente ubicadas en la parte alta, media y baja de la subcuenca, se reduce el volumen de 517,614 m^3 a 240,273 m^3 . A partir de las propuestas de restauración se evita el desbordamiento del vaso, lo que permitiría recibir 7,262 m^3 adicionales.

CONCLUSIONES Y DISCUSIONES GENERALES

La parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios ha presentado un gran deterioro de su ciclo hidrológico, principalmente en el manejo de las variables de escurrimiento superficial y de infiltración, debido al aumento de la superficie impermeable, la deforestación y la implementación de infraestructura hidrosanitaria urbana tradicional como única estrategia para el manejo de aguas pluviales urbana. Estas acciones han provocado el aumento de inundaciones, desperdicio del agua, sobreexplotación de acuíferos y contaminación del agua. Por lo tanto, las tecnologías sustentables que se proponen en el presente artículo son acciones generales que permiten encaminar a la subcuenca de estudio hacia una restauración hidrológica urbana, así como contribuir como marco de referencia teórico y técnico en la toma de decisiones para el manejo sustentable de las aguas pluviales.

El manejo de herramientas computacionales para la modelación hidrológica e hidráulica permite conseguir una interpretación del fenómeno más apegado a la realidad, donde se observe en distintos periodos de tiempo y con la utilización de diversos parámetros, tanto hidrológicos como hidráulicos, lo que ocurre en una tormenta.

El programa SWMM 5.1 es unidimensional, es decir, considera los flujos de agua en vectores de una sola dirección. Para visualizar más a detalle la distribución de los escurrimientos pluviales

urbanos, se deberá considerar la utilización de una herramienta computacional con más parámetros que permita modelar de manera bidimensional. Así, sería posible generar mapas precisos de inundación, que muestren zonas afectadas a través del tiempo, según el modelo.

El total de agua que se modela en este trabajo es únicamente la que proviene de la lluvia de diseño, es decir, no se contemplan las descargas de aguas residuales a la infraestructura hidrosanitaria urbana. Investigaciones futuras pueden apuntar hacia su consideración, con el objetivo de modelar de manera más precisa la cantidad y calidad de agua pluvial combinada con residual que fluye por las tuberías.

El modelo indica que obras hidráulicas tales como colectores y vasos de regulación son rebasados en su capacidad. Como se sabe que el sistema de alcantarillado dispuesto en la subcuenca de estudio es combinado, la aseveración anterior implica que aguas residuales brotan hacia la superficie y fluyen por las calles. Especificar los lugares exactos donde esto sucede, además de precisar el nivel de contaminación y daño a la salud pública deben ser objetivos de futuras investigaciones. Para ello es imperativo conocer los límites en el funcionamiento de la infraestructura hidrosanitaria urbana.

Se sugiere contar con datos más precisos sobre la configuración topográfica de la subcuenca de estudio, especialmente sobre las zonas donde se acumula el agua de manera masiva, como es el caso de los vasos reguladores. Para detallar esa información se recomienda generar “curvas área-capacidad”.

Es recomendable ampliar el área de estudio para determinar cómo se comportan los escurrimientos superficiales urbanos en la parte poniente de la subcuenca de análisis. Además, se desconoce el comportamiento de los escurrimientos pluviales urbanos en las partes medias y bajas de la subcuenca del río San Juan de Dios. Nuevas investigaciones pueden apuntar hacia la clarificación de los anteriores planteamientos, traducidos en las siguientes dos preguntas: ¿Qué comportamiento presentan los escurrimientos pluviales

urbanos al poniente del área de estudio? ¿Qué sucede aguas abajo de la Calzada Lázaro Cárdenas?

El modelo es perfectible en cuanto a la consideración de datos primarios, obtenidos a partir de la información disponible. Sería adecuado hacer un levantamiento de la configuración hidráulica de la infraestructura hidrosanitaria urbana de la zona. Se recomienda mejorar la información topográfica disponible con modelos digitales de elevación. Asimismo, extender la investigación hacia la definición de parámetros de infiltración en función de pruebas de permeabilidad hechas en campo. Así será posible apuntar hacia la determinación del comportamiento del agua subterránea de la zona.

Existen factores externos que no se han considerado en el modelo hidrológico e hidráulico. Uno de ellos, que modifica considerablemente el funcionamiento de la infraestructura hidrosanitaria urbana, es la presencia de basura. Esta limita el funcionamiento de las obras hidráulicas y compromete la calidad del agua que escurre por las vialidades y que fluye a través de los colectores. Además de la basura, deberán considerarse en futuras investigaciones las fugas de agua existentes en la infraestructura. Cuando estas existen, fluye una menor cantidad de agua por medio de la infraestructura e incrementa la contaminación del suelo y mantos freáticos en la zona.

A pesar de las limitaciones con las que cuenta el *software* SWMM 5.1, se considera que es importante la modelación del comportamiento de los escurrimientos pluviales urbanos de la zona. De esa manera puede darse un primer paso hacia la evaluación del estado actual del sistema hidráulico urbano para, posteriormente, realizar propuestas y proyectos encaminados hacia la restauración (Gleason, 2014).

Futuras investigaciones en materia de meteorología pueden ser realizadas y aplicadas a este modelo hidrológico e hidráulico. Pueden considerarse otros eventos de lluvia más intensos o con una duración de tiempo mayor que la que se ha considerado. De esta manera, pueden existir escenarios más críticos los cuales comprometan mucho más el funcionamiento de la infraestruc-

tura hidrosanitaria urbana y, por tanto, la seguridad y salud de las personas que habitan la zona.

Aunque se menciona brevemente la contaminación de las aguas pluviales en la subcuenca de estudio, es un tema que al momento no es previsto e implementado por las autoridades correspondientes. Por lo tanto, es de suma importancia que sea mencionado en la presente investigación, con la finalidad de dar a conocer a la comunidad científica la ausencia de dicho tema.

Si consideramos que la evaluación del estado actual del sistema hidráulico es el primer paso para dar a conocer posteriores estrategias (Gleason, 2016) y tomando en cuenta la propuesta de re-conceptualización de la infraestructura de drenaje orientada hacia la reutilización y reciclaje más que al alejamiento de agua (Córdova, 2014), se concluye que esta modelación es un prototipo para mejorar procesos de toma de decisiones para el manejo de las aguas pluviales urbanas.

Además de tener alcances técnicos meramente en términos de manejo de aguas pluviales, este artículo también apunta hacia la reflexión de la conservación y preservación del agua para su adecuada gestión en el AMG. Se considera importante apuntar lo anterior, ya que de continuar con la tendencia de crecimiento poblacional actual, a partir del año 2030 el agua por escurrimiento no será suficiente para proveer la demanda hídrica doméstica (Vázquez de León, 2016).

Por último, para conocer de manera más precisa el comportamiento de los escurrimientos pluviales urbanos, la presente investigación tiene el potencial de evolucionar hacia la descripción del comportamiento de todo el ciclo del agua en la zona de estudio. Esto es, medir, monitorear y registrar datos que permitan cuantificar y describir las variables del ciclo hidrológico: precipitación, escurrimiento, infiltración, evapotranspiración. Para lograr este fin es necesaria la utilización de equipo especializado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abi Aad M., Suidan M. y Shuster W. (2010). "Modeling Techniques of Best Management Practices: Rain Barrels and Rain Gardens Using EPA SWMM-5". *Journal of Hydrologic Engineering*, pp. 434-443.
- Álvarez Díaz, C. (1996). "Aportaciones metodológicas al estudio de la contaminación litoral originadas por vertidos y alivios procedentes de redes de saneamiento urbano".
- American Society of Civil Engineers (ASCE) y Water Environment Federation (WEF) (1992). "Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems", *ASCE Manuals y Reports of Engineering Practice*, núm. 77, WEF *Manual of Practice FD-20*. Nueva York.
- Andrade, Á. (2004). *Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integral del recurso hídrico*. Ciudad de México: PNUMA.
- Arden, S., Ma, X., y Brown, M. (2014). "An Ecohydrologic Model for a Shallow Groundwater Urban "nvironment". *Water Science et Technology*, pp. 1789-1797.
- Bezerra E., Silva C., Leite M. y Koide S. (2017). "Analysis of the Urbanization Evolution Effect on Runoff Using SWMM and ABC Models", *ICUD*. Praga.
- CA604 UDG. (2013). "Restauración del ciclo hidrológico en zonas urbanas: el caso de la parte alta de la subcuenca de San Juan de Dios (El Deán)". Guadalajara, Jalisco, México: Universidad de Guadalajara, Guadalajara.
- Casiano, C., Ozerol, G. y Bressers, H. (2017). "Governance Restricts: A Contextual Assessment of the Wasterwater Treatment Policy in the Guadalupe River Basin, Mexico. *Utilities Policy*, pp. 29-40.
- CAP-NET. (2005). "Plan de Gestión Integral del Recurso Hídrico: Manual de capacitación y guía operacional recurso hídrico". Recuperado en 2017. Obtenido de http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM_Files/Manual%20Planes%20GIRH.pdf
- CEA Jalisco. (s. f.). Comisión Estatal del Agua Jalisco. Recuperado el 2017, de Lago de Chapala: <http://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/chapala/>

- CONAGUA. (20 de abril de 2015). "Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero de Atemajac (1401), estado de Jalisco".
- Comisión Estatal del Agua (CEA) (2009). "Proyecto integral de saneamiento y abastecimiento de la Zona Conurbada de Guadalajara". Recuperado en julio de 2017, de <http://www.ceajalisco.gob.mx/zcg-proyecto.swf>
- Córdova, F. (2014). "Agua, energía y vivienda: retos y alternativas". Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- De Vleeschauwer, K., Weustenraad, J., Nolf, C., Wolfs, V., De Meulder, B., Shannon, K., et al. (2014). "Green-Blue Water in the City: Quantification of Impact of Source Control versus End-of-Pipe Solutions on Sewer and River Floods". *Water Science and Technology*, pp. 1825-1837.
- Ellis, J. y T. Hvited-Jacobsen (1996). "Urban Drainage Impacts on Receiving Waters", *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34
- EPA (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Cincinnati.
- GDRC (2008). "Principal Components of IUWRM". Recuperado en julio de 2017. Obtenido de <http://www.gdrc.org/uem/water/iwrm/1pager-10.html>
- Gleason, J. A. (2016). Historia del deterioro del ciclo del agua en el área metropolitana de Guadalajara, *Aportaciones téóricas en torno al estudio del arte, la arquitectura y la ciudad*. México, pp. 96-112.
- (2016a). "Gestión y planeación del sistema hidrosanitario del área metropolitana de Guadalajara. Un reto hacia la sustentabilidad". Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- (2014). *Sistemas de agua sustentables en las ciudades*. México: Trillas.
- Gleason, J. A. y Córdova, F. (2014). "Hacia una gestión sustentable del agua en la zona la zona conurbada de Guadalajara: los retos en la política pública". *Ciudad-Metrópoli Guadalajara: su presente y escenarios*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, pp. 269-300.
- Gutiérrez Muñozerro, C. (1992). La gestión de las infraestructuras de drenaje urbano, inundaciones y redes de drenaje urbano (J. Dolz, M. Gómez, y J.P. Martín, eds.). Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Huang, J., Li, Y., Niu, S. y Zhou, S. (2014). "Assessing the Performances of Low Impact Development Alternatives by Long-Term Simulation for a Semi-Srid Area in Tianjin, Northem China". *Water Science and Technology*, pp. 1740-1745.
- IITAAC (2017). "Informe del análisis del proyecto ejecutivo del vaso regulador El Deán-02". Guadalajara.
- Ingeniería Sanitaria y Ambiental (s.f.). "Diseño urbano sensible al agua y técnicas de drenaje urbano sostenible (TDUS)". Recuperado en 2017, de <http://www.geama.org/sanitaria/index.php?s=11>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2011). *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología, escala 1: 250, 000, Serie II*. Aguascalientes.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2013). *Introducción a las cuencas urbanas*. Juitepec: IMTA.
- IWA (2012), *Water Sensitive Cities*. Londres: IWA Publishing.
- Jiang L., Chen Y. y Wang H. (2015). "Urban Flood Simulation Based on the SWMM Model". *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*, pp. 186-191.
- Kourtis I.M., Kopsiaftis G., Bellos V. y Tsihrintzis, V.A. (2017). "Calibration and Validation of SWMM Model in Two Urban Catchments in Athens, Greece". 15th International Conference on Environmental Science and Technology. Rhodes.
- Leskens, J. G., Brugnach, M., y Hoekstra, A. Y. (2014). "Application of an Interactive Water Simulation Model in Urban Water Management: A Case Study in Amsterdam". *Water Science and Technology*, PP. 1729-1739.
- Llaguno, O. et al. (2016). "Modelización del flujo superficial para el trazo de una red de drenaje pluvial en la ciudad de Cancún, Quintana Roo, México". Acta universitaria. *Multidisciplinary Scientific Journal* 26(NE-2). doi: 10.1517/au.2016.1063.
- Mendoza, E. (2013). "Manejo integral de las aguas pluviales como medida de mitigación de las inundaciones en las zonas urbanas: el caso de la parte alta de la subcuenca de San Juan de Dios" (tesis de licenciatura). Guadalajara, Universidad de Guadalajara.

- Ministerio del Medio Ambiente (s.f.). “Disponibilidad de áreas verdes”. Recuperado en julio de 2017, de http://www.mma.gob.cl/1304/articulos-52016_Capitulo_6.pdf
- Morote, Á. y Hernández, M. (2017). “El uso de aguas pluviales en la ciudad de Alicante. De viejas ideas a nuevos enfoques”. *Papeles de Geografía*.
- Philip, R. (2011). “Gestión integral del agua urbana para la ciudad del futuro”. Gino Van Begin (responsable). *Kit de capacitación SWITCH*. ICLEI-Local Governments for Sustainability, European Secretariat.
- Porse, E. (2014). “Risk-Based Zoning for Urbanizing Foodplains”. *Water Science and Technology*, pp. 1755-1763.
- Poppema, D. (2014). “Storm Water Management In Guadalajara” (tesis de licenciatura). Guadalajara.
- Rivera, P., y Aguilar, A. (2015). “La gestión integral del agua en zonas urbanas: caso de estudio Zatecas-Guadalupe, México”. *Tecnología y Ciencias del Agua*, pp. 125-142.
- SIAPA (2017). “Vaso regulador el Deán-02: proyecto ejecutivo”. Jalisco
- SINIA (2016). “Superficie de área verde urbana por habitante”. Recuperado el 2017, de Sistema Nacional de Información Territorial: <http://sinia.minam.gob.pe/indicadores/superficie-area-verde-urbana-habitante>
- Sustaita, G. (2002). *El siglo XX, los decenios de Guadalajara*. Guadalajara: Instituto Cultural Ignacio Dávila Garibi, A. C.
- UDFCD (1992). *Urban Storm Drainage Criteria Manual*, vol. 3, Denver.
- Urich, C. y Rauch, W. (2014). “Modelling the Urban Water Cycle as an Integrated Part of the City: A Review”. *Water Science and Technology*, pp. 1857-1872.
- Vargas, É., y Márin, A. (2016). “Costa Rica demanda una gestión integral del recurso hídrico: escenario latinoamericano y la realidad del país”. *Revista Electrónica de las Sedes Regionales de la Universidad de Costa Rica*, pp. 1-18.
- Vázquez, M. D. (2016). “Demanda hídrica en el área metropolitana de Guadalajara” (tesis). Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- Zafra Mejía, C. A., Temprano González, J. y Tejero Monzón, J. I. (2007). “Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía”. *Ingeniería e Investigación*, pp- 4-10.
- Zhang S. y Guo Y. (2015). “SWMM Simulation of the Stormwater Volume Control Performance of Permeable Pavement Systems”. *Journal of Hydrologic Engineering*.