

## ***Hidrología urbana con criterios de sustentabilidad\****

ALFREDO URÍAS ANGULO  
FRANCISCO ÁLVAREZ PARTIDA

**Resumen:** *en este capítulo, se analizan los criterios de sustentabilidad de los sistemas de drenaje pluvial urbano y se hace una comparativa entre dos proyectos aplicados en un desarrollo habitacional en un bioclima templado de México. Uno de los proyectos fue diseñado como un sistema convencional de manejo de aguas pluviales y el otro utilizando sistemas más sustentables llamados Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). El estudio se apoya en un análisis hidrológico y el software xpdrainage® de diseño y evaluación. También se menciona y concluye cómo los SUDS se pueden implementar en las regiones con este tipo de bioclima.*

**Palabras clave:** *manejo de aguas pluviales, desarrollo habitacional sustentable, impacto hidrológico cero, SUDS.*

**Abstract:** *In this chapter, the sustainability criteria of urban storm drainage systems are analyzed and a comparison is made between two projects, applied in a housing development, in a temperate bioclimate in Mexico. One of the projects was designed as a conventional storm water project and another using more sustainable systems, called Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). The study is based on a hydrological analysis and on xpdrainage® software for design*

• *Agradecimientos:* Se agradece a la empresa XP Solutions por su asistencia y permisos para el uso del software xpdrainage® con licencia educacional, el cual fue de gran ayuda para expresar y entender mejor el proceso de diseño y análisis de un proyecto con SUDS.

*and evaluation. It also mentions and concludes how SUDS can be implemented in regions with this type of bioclimate.*

**Keywords:** *storm water management, sustainable residential development, zero hydrological impact, SUDS.*

## PROBLEMÁTICA

La problemática central que se analizará es el impacto a los elementos del ciclo hidrológico en zonas urbanas; se atribuye, como causa principal, la fuerte presión que el desarrollo urbano genera sobre las áreas naturales y suelos anteriormente agrícolas.

En la figura 3.1 se observa un árbol de problemas que muestran la interrelación y complejidad de una urbanización que produce grandes superficies impermeables como: eliminación de la vegetación natural, pérdida de biodiversidad y de evapotranspiración, baja en los flujos subsuperficiales y flujo base; y los distintos efectos que generan la problemática, como mayor cantidad de escurrimiento en un menor tiempo, el cual ocasiona arrastre de contaminante, erosión e impacta en los ecosistemas; un menor tiempo de concentración y volumen de agua a manejar, la cual supera la red de drenaje pluvial provocando inundaciones en zonas medias y bajas de la cuenca, daños materiales y afectaciones a la actividad productiva; menor infiltración al subsuelo, para recargar los acuíferos y mayor probabilidad de escasez.

Estos cambios que se generan al pasar de un estado natural a uno urbanizado, permiten que la evapotranspiración se vea reducida por la falta de vegetación y de humedad; el flujo superficial es mucho mayor y ocurre en un tiempo más corto debido a la impermeabilización del suelo, los flujos subsuperficial y base se reducen, y se tiene un caudal base más bajo.

Como se mencionó antes, hay importantes impactos ambientales de la urbanización a la calidad del agua de escorrentía. Este proceso es más intenso en las primeras lluvias del año, normalmente se le conoce como el efecto de primer lavado o “First flush” en inglés (Moynihan,

**FIGURA 3.1 ÁRBOL DE PROBLEMAS SOBRE EL MANEJO DE AGUAS PLUVIALES URBANAS**



2015). Está documentado que, en los primeros 25mm de lluvia, generalmente, se concentra el 95% de la carga contaminante en suspensión (Tucci, 2006). A esto se le conoce como contaminación difusa ya que no proviene de una fuente puntual detectable como una descarga sanitaria o industrial sino que proviene y se va acumulando desde varios puntos de una cuenca (Novotny, 1995).

### Situación en el contexto de la región

En la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG) se calcula que se hay alrededor de \$530 millones de pesos (30.57 millones de dólares) en pér-

didadas anualmente debido a las inundaciones, sin contar otros efectos negativos asociados a esta problemática (Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado, 2008).

La situación está siendo gestionada desde distintas iniciativas, como la construcción de más infraestructura de colectores y vasos reguladores, ampliación y mejora de cauces urbanos. Estas acciones, principalmente, vienen por parte de la Comisión Estatal del Agua (CEA), la Secretaría de Infraestructura y Obra Pública (SIOP), el Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), en conjunto con la participación de empresas privadas de consultoría y construcción. En específico, se viene manejando desde 2008–2009 el Programa de Manejo Integral de las Aguas Pluviales (PROMIAP) como eje rector para definir la infraestructura que se construirá en el corto, mediano y largo plazo para mitigar las problemáticas asociadas (SIAPA, 2008). También, desde 2014, se ingresó en la Ley de Estatal de Aguas de Jalisco el artículo 86-Bis, aunque se practica desde 2008, aproximadamente, en los municipios de la ZMG.

Este artículo obliga a quien genere áreas impermeables mediante cualquier obra de construcción a que incluya, en sus proyectos, medidas o dispositivos de regulación del caudal pico para lluvias con un periodo de retorno de 10 años, denominada Impacto Hidrológico Cero (IHC) el cual busca que el caudal máximo urbanizado sea igual o menor que el que se presentaba en estado natural (o antes de urbanizarse) con el fin de ayudar a mitigar el nuevo exceso de volumen de aguas generado por cualquier construcción, sin embargo, existen más criterios, que deben tomarse en cuenta, para lograr un funcionamiento adecuado de estos sistemas en términos de sustentabilidad.

### **Conceptos y técnicas alternativas de manejo sustentable del agua pluvial**

Existen diversos enfoques teórico-conceptuales en prácticas internacionales que están desarrollando estrategias que tengan un manejo del

agua más integral, teniendo en cuenta la sustentabilidad como un fundamento y atendiendo, a la vez, a la disminución de las problemáticas antes mencionadas. Dentro de estos enfoques, uno de los principales es el Desarrollo Urbano Sensible al Agua el cual se creó en Australia. Paralelamente, se han desarrollado otros conceptos como el Desarrollo de Bajo Impacto (LID), por sus siglas en inglés, la Infraestructura Verde en Estados Unidos y los SUDS como se les nombra en España y Reino Unido (Elliott & Trowsdale, 2007).

Los sistemas SUDS buscan cambiar la manera en que se maneja el agua pluvial, intentando controlar lo más cerca posible de la fuente mediante infiltración, evapotranspiración, detención y retención de una mayor cantidad de agua en el sitio (Novotny, Ahern & Brown, 2010). Este cambio hace falta en las estrategias que se han venido trabajando en la ZMG y por lo tanto es pertinente investigar sobre estos conceptos y sistemas para que sean implementados efectivamente, por lo que en este trabajo buscará justificar su uso en comparación con los sistemas que ya se utilizan en la región.

En el *software* que se utilizará para modelar los proyectos de manejo de aguas pluviales que se comparan, se utiliza un método de tránsito de hidrogramas en reservorios llamado Muskingum-Cunge el cual es descrito como un método hidrológico en reservorios o vasos, el cual es usado para determinar la atenuación al caudal pico que experimenta un hidrograma al entrar a un reservorio o algún otro tipo de espacio de almacenamiento. Los datos necesarios para este tipo de análisis son el hidrograma de entrada y las características del reservorio (almacenamiento e instalaciones de salida).

Los métodos hidrológicos están basados en el concepto de que el caudal de entrada, caudal de salida y almacenamiento deben adherirse al principio de conservación de masa o continuidad que se explicara a más adelante. El método Muskingum ignora la ecuación de momento y se basa solamente en la de continuidad y es aplicable para ondas de difusión (Molina-Aguilar & Aparicio, s.f.).

Asimismo, dentro del *software*, es necesario calcular la velocidad de flujo en conducciones cerradas a abiertas mediante la ecuación de Manning, la velocidad está en función del área hidráulica, la rugosidad del material y la pendiente longitudinal por la que se mueve (Sotelo, 1995).

## OBJETIVOS

1. Demostrar la pertinencia y viabilidad técnico-económica de la implementación de algunos SUDS en el predio urbanizado de análisis, establecidos con el fin de resaltar algunos beneficios de manera cuantitativa en comparación con la infraestructura convencional.
2. Desarrollar dos sistemas de drenaje pluvial (convencional y con el uso de SUDS) funcionales hidráulicamente para lograr el Impacto Hidrológico Cero.
3. Comparar costos y cantidad de materiales necesarios para cada proyecto para realizar comparativa
4. Evaluar sistemas e identificar cuál es la mejor opción en términos de sus beneficios ambientales, sociales y económicos.
5. Concluir sobre los alcances de los hallazgos obtenidos en la comparativa de los dos proyectos.
6. Identificar y describir cómo pueden desarrollarse los SUDS a un nivel urbano más amplio en las zonas con las mismas características bioclimáticas, así como los beneficios que ofrecen en contraste con las prácticas actuales.

## METODOLOGÍA

1. Identificar características del predio como usos de suelo, diseño urbano, dirección de escurrimientos, delimitación de microcuencas, ubicación de puntos de concentración.
2. Recoger información de intensidades de lluvia para el área de estudio.

3. Desarrollar los cálculos hidrológicos e hidráulicos que definirán el diseño de los sistemas comparados, calculando el caudal máximo mediante el Método Racional Americano.
4. Caracterizar proyecto de drenaje pluvial convencional separativo en los elementos que lo conforman, función y costos.
5. Ingresar información hidrológica a *software* de diseño especializado en SUDS (xpdrainage®), para generar hidrogramas de cada microcuenca del predio en análisis y conectar los caudales a los sistemas correspondientes.
6. Caracterizar proyecto de drenaje pluvial con SUDS en los elementos que lo conforman, dimensiones, función y costos.
7. Realizar un resumen comparativo de funcionamiento hidráulico general y costos paramétricos totales.
8. Identificar los beneficios ambientales, sociales y económicos identificados tanto para el predio específico como para cuencas urbanas de mayor tamaño.

## ESTUDIO COMPARATIVO

Ambas propuestas, proyecto IHC y SUDS se aplicaron en un fraccionamiento ubicado en la parte alta de la cuenca de Arroyo Hondo al norte del municipio de Zapopan, Jalisco, México, a unos 150 metros al poniente del Bosque del Centinela. Consta de 2.7 hectáreas, en una zona bioclimática templada.

### Hidrología básica del sitio

El objetivo del cálculo hidrológico es conocer los gastos máximos (o gastos picos) correspondientes a cada microcuenca del predio analizado, tanto los que se presentan naturalmente, así como los que se presentarán cuando se haya urbanizado.

El método elegido será el Método Racional Americano, preferido por su simplicidad y confianza, (Comisión Nacional del Agua, Conagua, 2007).

## Usos de suelo

Para obtener el coeficiente de escurrimiento, es necesario ponderar los valores en relación con el área que representan, en la tabla 3.1 se muestra el cálculo resumido de todo el predio, el valor encontrado es igual a 0.7576, valor que ubica al predio en un alto grado de urbanización ya que como, se puede observar, el uso habitacional y de vialidades abarcan, aproximadamente, el 86%, si se le suma a esto el área de estacionamientos y equipamiento privado (en este caso es la casa club) queda solo 13% del total como área permeable.

## Resultados de hidrología del predio

El fraccionamiento se dividió en 7 microcuencas, en la figura 3.3 se muestra la configuración urbanística y la delimitación de microcuencas que se determinó, la cual está en función la pendiente longitudinal y transversal de las vialidades, el arreglo de las manzanas y obstrucciones del flujo pluvial como topes, machuelos, banquetas, etcétera. Se pueden observar, además, las áreas verdes y la dirección de los escurrimientos pluviales que van hacia el suroeste en dirección al arroyo.

En la figura 3.2 se muestran los coeficientes de escurrimiento y gastos máximos para cada microcuenca, así como el gráfico del hidrograma urbanizado y natural para todo el predio, así como los datos básicos para el cálculo como la intensidad de lluvia, tiempo de retorno de diseño, tiempo de concentración y áreas de microcuencas.

A continuación, se mostrarán los dos diseños terminados, uno con infraestructura convencional y otro con el uso de sistemas SUDS, con el fin de realizar comparación final de beneficios y de costos paramétricos.

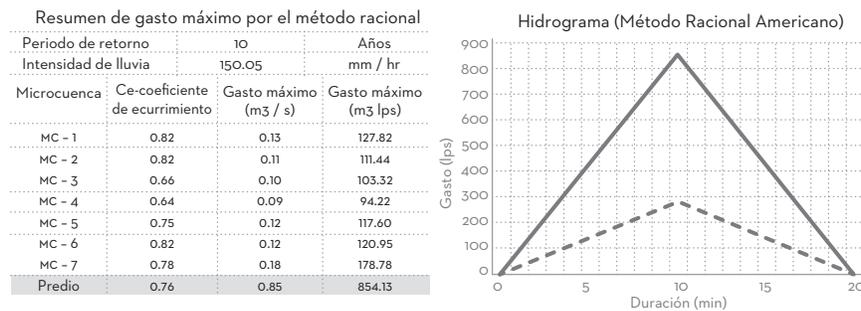
## Proyecto convencional de IHC

El sistema IHC consta de 5 bocas de tormenta, una red de tuberías de PVC con pozos de visita, una cuneta de concreto y dos depósitos sub-

**TABLA 3.1 RESULTADO DE COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO PARA CADA USO DE SUELO DEL PREDIO**

Uso de suelo	Ce	Área en m <sup>2</sup>	Porcentaje total	Ce Ponderado
Habitacional H4-H	0.80	15581.81	57.65%	0.46
Áreas verdes	0.25	3466.48	12.83%	0.03
Vialidades	0.90	7370.75	27.27%	0.25
Estacionamientos	0.90	247.27	0.91%	0.01
Equipamiento	0.80	360.40	1.33%	0.01
<b>Total</b>		<b>27026.70</b>		<b>0.7576</b>

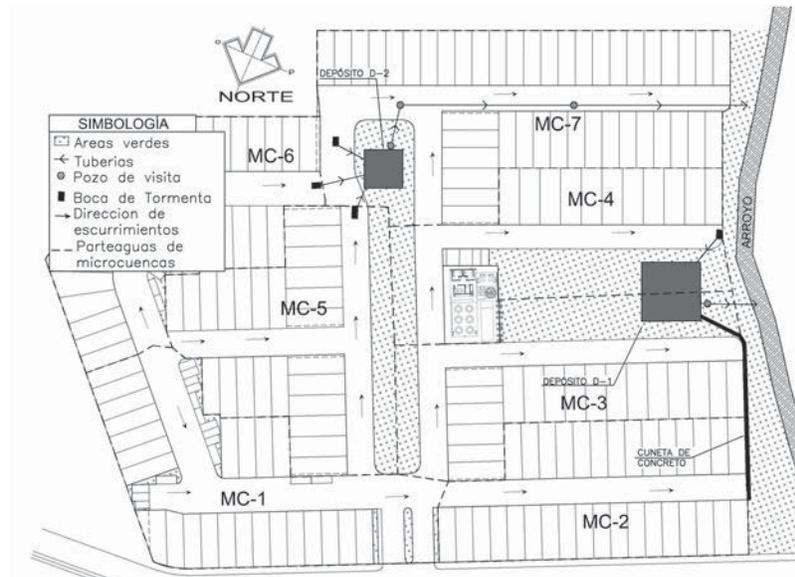
**FIGURA 3.2 HIDROGRAMA CARACTERÍSTICO DEL DESARROLLO (DERECHA) Y GASTOS MÁXIMOS (IZQUIERDA)**



terráneos con estructura de concreto, muros de mampostería y base permeable para facilitar la infiltración. Los dos depósitos detienen la lluvia y la van desfogando lentamente hacia el arroyo como se muestra en la figura 3.3.

En la figura 3.3 se muestra el proyecto de infraestructura IHC de manera conceptual para facilitar su visualización, además se muestran las microcuencas de análisis y la dirección de los escurrimientos pluviales sobre la vialidad.

FIGURA 3.3 DIBUJO CONCEPTUAL DEL PROYECTO CONVENCIONAL



Como se puede observar, la cuneta de concreto recibe los escurrimientos de las microcuencas 1, 2 y 3. Una boca de tormenta recoge lo de la 4 y conduce hacia el depósito de tormentas denominado D-1. Las 3 bocas de tormenta en la parte sureste conducen hacia el depósito de tormenta D-2. El depósito D-1 tiene unas dimensiones de 16 x 16m en planta, con 0.95 m de altura, y el depósito D-2 es de 10 x 10m en planta y 1.10m de altura. Ambos desfogan hacia el arroyo entre 20 y 25 horas después de la tormenta debido a que el canal de salida es de un diámetro reducido, el volumen de agua, que queda en la parte baja, se vacía por infiltración.

Este diseño tiene un funcionamiento hidráulico adecuado ya que sus tuberías tienen la capacidad suficiente para conducir el gasto máximo calculado y los depósitos regulan el gasto pico para reducirlo al de gasto en breña, lo requerido para cumplir con el Impacto Hidrológico Cero.

## Proyecto con SUDS

En función de la configuración urbana, las áreas para aplicar los sistemas SUDS, será en 2 grandes áreas verdes; una, en medio del predio, y otra, al lado del arroyo, mientras que la del medio resulta la adecuada para aplicar sistemas de biorretención, cuneta verde y una detención pequeña, donde se intercepte y trate parte importante del volumen de agua, y en la parte baja, en el área adyacente al arroyo, será adecuada para contar con un sistema de conducción de cuencas verdes que dirijan el flujo hacia un estanque de detención, si no es suficiente, se agregarán zanjas y pozos de infiltración.

Lo primero, será explicar que el sistema funciona hidráulicamente para lograr el Impacto Hidrológico Cero, seguido se detallarán los beneficios que ofrece el sistema en comparación con el convencional especialmente en la dimensión ambiental y finalmente se revisarán los costos de construcción y la cantidad de materiales y actividades necesarios.

El diseño de estos sistemas se apoyó, como ya se mencionó antes, en un *software* especializado de diseño de SUDS llamado *xpdrainage*<sup>®</sup> el cual, de manera visual, y cuantitativa permite manejar el proceso de diseño y evaluación. Genera modelos sencillos de una y dos dimensiones utilizando las ecuaciones de Manning para el análisis de conducciones y la ecuación de almacenamiento Muskingum-Cunge para el análisis de los sistemas SUDS, la cual calcula el tiempo de traslado y el coeficiente de retención de cada subsistema.

Para comprobar, de manera sencilla, el funcionamiento hidráulico y tener una base comparativa confiable, se utilizó el mismo método de cálculo de los hidrogramas que se utiliza para cualquier proyecto pluvial de la ZMG, que es lo que determina el diseño de volumen de los sistemas. El tiempo de concentración, para todas las cuencas se tomó como 10 minutos, por lo que el caudal pico se presenta en todo el desarrollo en este momento, mismo que también se calculó con la fórmula del

**TABLA 3.2 RESUMEN DE EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS SUDS**

Sistema SUDS	Nivel máximo (m)	Profundidad máxima (m)	Caudal entrante máximo (lt / s)	Volumen inundado máximo (m³)	Caudal de salida máximo (lt /s)	Porcentaje disponible (%)	Estatus
Biorretención 1	583.95	1.62	122.1	0.000	22.2	0.00	OK
Cuneta Verde 2	582.51	1.21	133.7	0.000	77.2	93.36	OK
Depósito D-2*	580.77	0.97	190.9	0.000	36.2	19.50	OK
Cuneta Verde 1	580.15	0.35	266.0	0.000	273.5	100.00	OK
Estanque de detención	578.20	1.00	341.6	0.000	39.9	27.61	OK
Zanja de infiltración	578.89	0.74	90.0	0.000	0.0	44.72	OK
Cuneta verde 3	578.59	0.39	73.5	0.000	71.3	8.66	OK
Pozo Absorción	575.76	5.76	36.1	0.000	27.6	6.07	OK
Arroyo	574.72	0.72	193.6	0.000	0.0	70.92	OK

Fuente: elaboración propia con el software xpdrainage®.

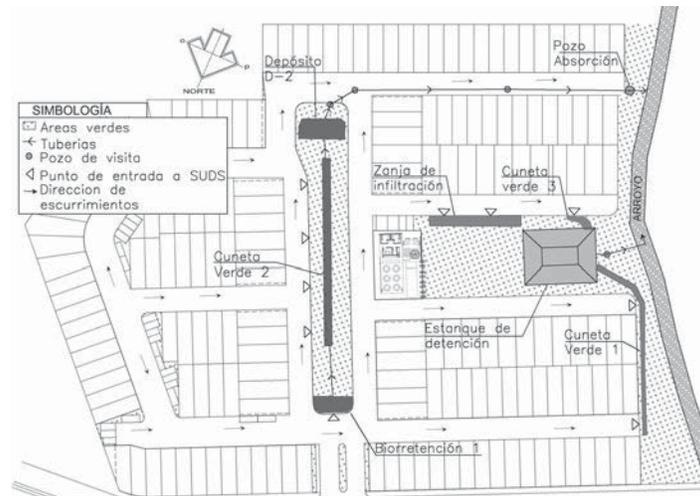
Método Racional Americano. Para el dimensionamiento de las tuberías se utiliza la fórmula de Manning.

La tabla 3.2 muestra los sistemas del diseño final utilizados con su nombre y los parámetros principales de evaluación que sirven para comprobar el correcto funcionamiento.

### Ubicación y dimensionamiento de los sistemas

En la figura 3.4 se observa la ubicación en planta de los sistemas SUDS, los cuales se pueden categorizar en sistema de tratamiento, conducción, infiltración, detención, aunque cada técnica puede realizar varias funciones y dependiendo de los objetivos y criterios de diseño definidos que se busquen será su dimensión y ubicación (Construction Industry Research and Information Association, CIRIA, 2007).

FIGURA 3.4. UBICACIÓN Y TIPOS DE SISTEMAS subs UTILIZADOS



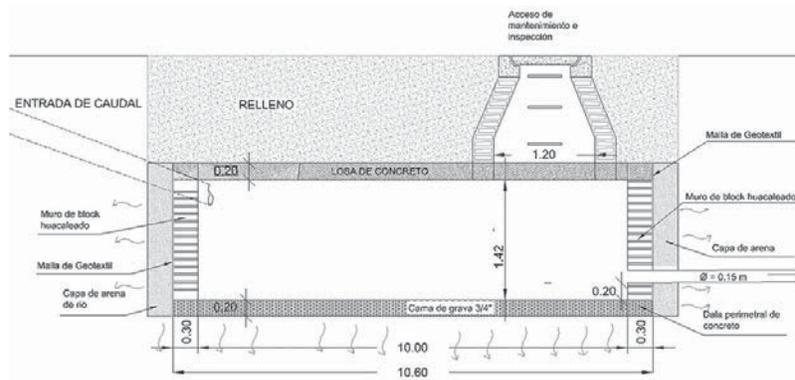
Se tiene entonces que, en este desarrollo de 2.7 hectáreas, se utilizó un sistema de biorretención, 3 cunetas verdes, dos depósitos de regulación (estanque de detención y depósito D-2), una zanja de infiltración y un pozo de absorción.

El sistema de biorretención se conforma por un área con vegetación y plantas de 65m<sup>2</sup>, una capa de filtrado de 1.2m de profundidad, una capa de drenado con grava 3/4" de 0.30m, y cuenta con un sistema de tubería perforada en el fondo para drenar, hacia la cuneta verde 2. Las cunetas verdes funcionan como conducción superficial hacia el estanque y el depósito D-2, las cuales son canales vegetados o empastados. Tienen dimensiones de base de 1.00m y ancho del espejo de agua de entre 1.5 y 2m, con tirantes máximos entre 40 y 60cm, respectivamente. La cuneta 2, además de conducir, tiene una zanja de 1 x 1m (ancho-alto) que por debajo está rellena de grava para facilitar la infiltración. La cuneta verde 3 tiene de base 1.00m y de espejo de agua máximo 2.00m, con un tirante máximo de 30cm, y una longitud de 11m, este conduce el gasto de la microcuenca 4 hacia el estanque.

**TABLA 3.3 CÁLCULO HIDROLÓGICO GENERAL DEL PREDIO Y DATOS BÁSICOS DE PRE-DIMENSIONAMIENTO**

Área	Superficie	Ce	Lc	Tc	Tr	Intensidad de lluvia	Caudal máximo	Volumen necesario de detención
	Has		metros	minutos	años	mm / hr	m <sup>3</sup> / s	m <sup>3</sup>
Total (urbano)	2.703	0.76	231.3	10	10	150.05	0.854	512.48
Total (breña)	2.703	0.25	231.3	10	10	150.05	0.282	169.10
Diferencia		0.51					0.572	343.38

**FIGURA 3.5 DEPÓSITO PLUVIAL SUBTERRÁNEO DE DETENCIÓN**



Vista en corte longitudinal

El estanque de detención se conforma por un área de base de 72m<sup>2</sup> y crece a 432m<sup>2</sup> por sus taludes, es un vaso o laguna seca que detiene temporalmente el agua pluvial. El depósito de tormenta D-2 tiene las mismas características y dimensiones que en el proyecto de drenaje convencional (véase figura 3.5). La zanja de infiltración consta de 30m de largo, por 1.50m de ancho y 1.00m de altura, se rellena con grava o gravilla y no lleva taludes. Y por último el pozo de infiltración es de 7 metros de profundidad y 1.40m de diámetro.

Al final de la tabla 3.2 se incluye el “arroyo”, para poder observar el caudal de entrada máximo, la finalidad es ver si el caudal que recibe supera al que se presenta en estado natural para el mismo periodo de retorno. El estatus OK muestra que no se presenta un nivel más alto que el nivel de excedencia del sistema que genera la inundación de este. Este dato, en conjunto con los caudales de entrada y salida máximos, son los principales a observar para evaluar el correcto desempeño hidráulico.

El caudal máximo en breña que se presenta en el desarrollo es de 282 lps, como lo muestra la tabla 3.3, por lo que el gasto que recibe el arroyo en el proyecto de SUDS cumple con el Impacto Hidrológico Cero. Los principales sistemas para lograr esto y que atenúan mayormente el gasto, como se mostró en la tabla 3.2, son los sistemas de detención, el depósito D-2 y el estanque de detención, los cuales reducen caudales de 190.9 lps y 341.6 lps a 36.2 lps y 39.9 lps respectivamente.

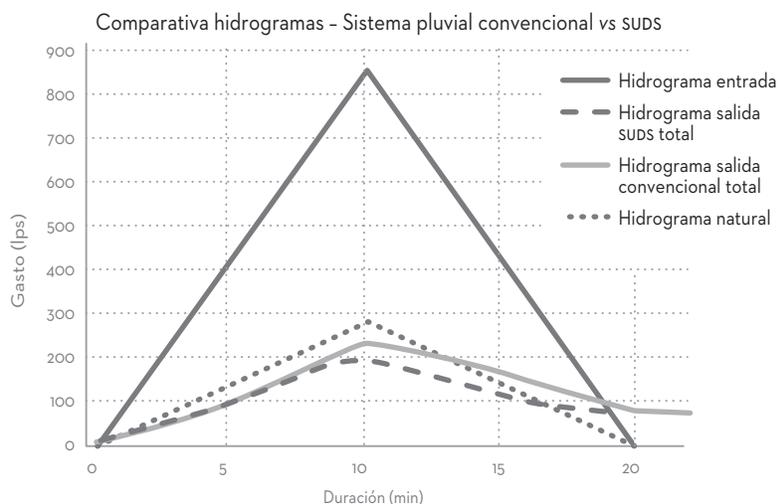
Entonces se ha comprobado que el sistema propuesto funciona hidráulicamente para lograr el Impacto Hidrológico Cero, lo siguiente será obtener costos paramétricos para este sistema, sin tener en cuenta costos de mantenimiento y / o operación necesarios.

## DISCUSIÓN

A continuación, se muestran las tablas y gráficos comparativos tanto de la función hidráulica, costos y uso de materiales para justificar el uso de SUDS como alternativa sustentable de manejo de las aguas pluviales. La figura 3.6 muestra el hidrograma de entrada, el cual es igual en ambos casos, y los de salida, la figura compara ambos sistemas.

Como se puede observar en el gráfico (véase figura 3.6), la reducción del gasto máximo de salida por debajo del gasto máximo en estado natural si se logra en ambos sistemas, se encuentra alrededor de los 25 lps, lo que dice que ambos son funcionales en el cumplimiento del Impacto Hidrológico Cero.

**FIGURA 3.6 GRÁFICO COMPARATIVO DE HIDROGRAMAS DE SALIDA ENTRE SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL CONVENCIONAL Y CON SUDS**



**TABLA 3.4 COMPARATIVA DE COSTOS PARAMÉTRICOS ENTRE AMBAS ALTERNATIVAS DE DRENAJE PLUVIAL**

Comparativa de costos paramétricos totales

Alternativa	Importe	Referencia proporcional
Convencional IHC	\$556,698.54	100.00%
Con SUDS	\$403,315.10	72.45%
Diferencia	\$153,383.44	

En cuanto a los costos, la tabla 3.4 resume y compara los resultados obtenidos en costos necesarios, la cual muestra que el uso de SUDS puede ofrecer una reducción del 37% del costo en comparación con el sistema convencional, con datos actualizados por inflación al 2017:

La tabla 3.5, nos resume el resultado de la comparativa en el uso de materiales y excavación. Como se puede observar los beneficios se

**TABLA 3.5 COMPARATIVA EN USO DE MATERIALES Y EXCAVACIONES PARA AMBAS ALTERNATIVAS**

Comparativa en uso de materiales y excavaciones					
Material	Unidad	A= Alternativa convencional	B= Alternativa con SUDS	Diferencia = B - A	Proporcional = 1 - (B / A) %
Excavaciones	m <sup>3</sup>	1452.95	1686.56	233.60	+16 %
Concreto	m <sup>3</sup>	31.49	17.46	-14.03	-45 %
Block 10x20x40	pzas	11740.00	4940.00	-10208.00	-58 %
Acero	Ton	3.02	1.68	-1.35	-45 %
Grava 3 / 4"	m <sup>3</sup>	71.20	117.84	46.64	+ 66 %
Arena	m <sup>3</sup>	75.74	93	17.26	+ 23 %
Malla geotextil	M <sup>2</sup>	209.96	125.93	-84.03	-41 %
Tubería PVC 6"	m	0.00	34.03	34.03	NA
Tubería PVC 10"	m	142.29	128.71	-13.58	-10 %
Tubería PVC 12"	m	20.81	0	-20.81	NA

reflejan en el ahorro económico, la regulación del agua en el origen para mitigar inundaciones aguas abajo y en que se mejorará la calidad del agua efluente. En el caso del uso de concreto, block, acero y tubería se redujo de manera importante, lo que clarifica aún más el carácter sustentable de este proyecto, ya la huella ecológica que estos tienen es significativa (Berge, 2009).

En el caso de las excavaciones, hubo un incremento, así como en el uso de grava y arena, debido a que en todos los casos estos materiales involucran mayor uso de espacio superficial y creación de trincheras en el caso de la cuneta verde 2 para mejorar la infiltración.

### **Beneficios en calidad del agua y a la comunidad**

Entre los beneficios que ofrecen los SUDS en contraste con los sistemas convencionales, podemos encontrar que llevan a cabo procesos que le dan un tratamiento al agua pluvial al eliminar contaminantes

presentes en las superficies urbanas, por ejemplo, sólidos suspendidos, metales pesados, bacterias, nutrientes (fósforo, nitrógeno), entre otros. Como parte de los alcances de esta investigación, no se hizo un análisis cuantitativo de la remoción de contaminantes estimada con los sistemas aplicados, sin embargo, la literatura guía sobre qué procesos lleva a cabo cada sistema y cuál es el potencial, de dichos procesos, para remover cada contaminante presente.

El artículo “Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection” (Jia, Tang, Lu, Yao, Yu & Zhen, 2013) desarrolla un índice multicriterial para seleccionar, de manera cualitativa (nulo, bajo, medio, alto), el potencial de cada sistema y proceso involucrado.

El proyecto con SUDS utilizó 5 sistemas diferentes que cubren la mayoría de los procesos necesarios, de entre estos, los mejores para remoción de contaminantes son la sedimentación, adsorción, infiltración, biodegradación, filtración y retención vegetal. Para la eliminación de sólidos suspendidos, los mejores procesos son la sedimentación y la filtración, donde el estanque de detención y la zanja de infiltración tienen alto potencial. En el caso del nitrógeno, los procesos de adsorción, infiltración y retención vegetal son los mejores, y los sistemas que mejor cumplen dichos procesos son la zanja de infiltración y biorretención. Y como última mención para eliminar el fósforo, el mejor proceso es la retención vegetal, la cual se presenta en mayor medida en la biorretención y en las cunetas de verdes.

### **Aceptación de la comunidad**

Es también fundamental, en el proceso de selección y diseño de un proyecto pluvial con SUDS, asesorar los posibles conflictos que pueden generar la implementación de los sistemas con la comunidad que habita los espacios. Para esto, el manual de SUDS de CIRIA (2007) presenta matrices que asisten la selección, en el caso de los sistemas aplicados en este capítulo; los sistemas con mayor aceptación comunitaria son las

biorretenciones y el estanque de detención, y los demás, normalmente, tienen una aceptación media. El manual especifica que las cunetas verdes y el estanque pueden generar algunas preocupaciones de seguridad por parte de los habitantes, asociado con el contacto directo con una superficie de agua, y sugiere que dichos detalles deben ser atendidos en la etapa de diseño.

### **Infiltración realizada e implicaciones**

En el proyecto con SUDS, el *software* calculó que se puede infiltrar, aproximadamente, un volumen de 7.90 m<sup>3</sup>, esto, durante el transcurso de la lluvia de 20 minutos, con un coeficiente de permeabilidad K de  $2.35 \times 10^{-6}$  m / s. Este es un valor bueno teniendo en cuenta la corta duración del evento, pero a eso se le suma lo que continua infiltrándose durante las siguientes horas hasta que se vacíen los sistemas, lo que da un total de, aproximadamente, 70 m<sup>3</sup>. Los sistemas que aportaron a estos resultados fueron el pozo de infiltración, la biorretención y la zanja de infiltración.

La decisión de utilizar sistemas de infiltración implica tener conocimiento de la permeabilidad, tipo de suelo y usos de suelo de las áreas de aportación. Y para conservar la capacidad, hay que dar un buen mantenimiento preventivo y correctivo con tal de eliminar azolves, proceso que normalmente se hace en los fraccionamientos, por lo cual no se considera un gasto extra. En los casos en que el agua que reciben los sistemas tiene alto nivel de contaminantes, se deben utilizar geotextiles para cubrir la zona en contacto con el suelo y evitar el paso de estos al subsuelo.

### **APLICACIÓN DE SUDS A ESCALA URBANA**

Enfocado, el planteamiento desarrollado al contexto urbano o de cuencas urbanizadas, también se pueden planear e implementar SUDS y tener mayores beneficios hidrológicos, sociales, económicos y ambientales.

Para realizar esto, según las investigaciones realizadas, una primera etapa debería ser llevar a cabo presentaciones y ponencias con el objetivo de sensibilizar y persuadir a actores responsables y comunidad académica principalmente sobre los motivos y beneficios que ofrecen los sistemas SUDS en comparación con las prácticas convencionales. En segunda instancia, llevar a cabo investigación, desarrollo, prueba y monitoreo de todos los tipos de SUDS en distintos contextos de un área urbana para medir y conocer su funcionamiento hidráulico, mejoras en calidad del agua y aceptación de la comunidad.

Posteriormente, es posible definir manuales locales para el diseño de los sistemas y crear las normas o legislación que obligue o incentive la integración de estos sistemas en proyectos de desarrollo urbano.

Además, puede haber otros enfoques para abordar la problemática. Por ejemplo, detectar necesidades y objetivos específicos por cuencas o subcuencas urbanas en función de las distintas condiciones topográficas, hidrográficas, edafológicas, geológicas, urbanas, etcétera. Esas necesidades y objetivos pueden modificar los criterios de diseño y, por ende, la manera en que se aborde un proyecto urbano.

Por ejemplo, un objetivo de una cuenca podría ser proteger la calidad del agua de un lago o río que es de alto valor ecológico o productivo, lo que significa que se daría mayor importancia a usar sistemas con mejor eficiencia para eliminar contaminantes y los que reduzcan los desbordes de colectores combinados hacia el medio ambiente.

Otro objetivo podría ser proteger y recargar los mantos freáticos que se encuentran sobreexplotados dándole mayor enfoque a tener sistemas que favorezcan la infiltración y captación del agua de lluvia. Otro ejemplo sería también proteger zonas con alto riesgo y vulnerabilidad ante la inundación dando prioridad a los sistemas de detención y regulación de gran volumen, entre otros objetivos estratégicos posibles.

Definir dichos objetivos y necesidades estratégicas son de gran importancia y utilidad para dirigir más eficientemente los recursos, no estandarizar soluciones y con esto, dar herramientas a los tomadores de decisiones para que se prioricen adecuadamente las acciones.

Para el caso concreto de la zona metropolitana de Guadalajara, los autores detectan y proponen algunas ubicaciones con alta viabilidad para etapas iniciales de implementación de SUDS. Los factores favorables son su ubicación alta en la cuenca que se insertan, una buena extensión de áreas verdes que facilitarían la construcción de mayor cantidad de SUDS y el alto nivel socioeconómico de la población que vive ahí, lo que sería de ayuda en cuanto a gastos de mantenimiento que requieren dichos sistemas.

Estas zonas forman parte de las Cuenca de Atemajac y del Ahogado, donde ambas sufren de constantes y cada vez más recurrentes inundaciones cada año en las partes medias y bajas de las cuencas; como ejemplo, una de las más afectadas son la zona del Canal Patria y el tramo del Río Atemajac desde Federalismo a Periférico Norte, en el caso de la Cuenca Atemajac. Y en la cuenca del Ahogado se presentan en varios puntos del valle, como en las colonias San Sebastián el Grande, Villas de la Hacienda, Fraccionamiento Real del Valle, entre otras.

Las zonas propuestas para la implementación de SUDS a mayor escala son, en la Cuenca de Atemajac, las que se encuentran a ambos costados de la Avenida Patria, en las cercanías de la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG), Andares y el Bosque Colomos, algunas de estas colonias son Royal Country, Colinas de San Javier, Lomas de Providencia; otro punto más aguas arriba es la colonia Valle Real, ubicada al oriente de la Avenida Aviación.

En la cuenca del Ahogado, se trata de la zona entre el Bosque de la Primavera y la Avenida López Mateos, en colonias como El Palomar, la Rioja, Bosques de Santa Anita, entre otras, lo que favorece la restauración hidrológica de las faldas del bosque.

El uso de SUDS es complementario a la infraestructura convencional y aplicándolos se obtienen beneficios añadidos. Algunos de los que no se han mencionado y son de importancia son la reducción de costos y energía consumida en tratar aguas residuales y en bombeos de aguas superficiales, este rubro es frecuentemente uno de los más intensivos en uso de energía por parte de los organismos de agua, representando

hasta 35% del uso de energía municipal (Natural Resources Defense Council, NRDC, 2009).

Como último punto, se debe mencionar la multifuncionalidad y variedad de combinaciones posibles para cumplir con distintos criterios, ya que la mayoría de los SUDS tiene la capacidad de tener varios procesos, entre ellos, el de control hidráulico, tratamiento de agua, amenidades y cuidado de la biodiversidad, los resultados estarán en función del diseño final y los objetivos buscados.

## CONCLUSIONES

Al compararse dos sistemas de manejo de agua pluvial para desarrollos habitacionales en bioclima templado de México, uno con IHC y el otro con SUDS, se encontró que ambos cumplen con la regulación de los flujos superficiales de agua en eventos de lluvia al reducir el gasto máximo por debajo del que se presentaba en estado natural, con lo que se logra evitar altas escorrentías en tiempos cortos y por lo tanto, inundaciones en las partes media y baja de la cuenca, cuando la red de drenaje pluvial o los cauces naturales se ven superadas, evitando, finalmente, los daños económicos y la pérdida de actividades productivas.

Se analizaron criterios económicos y de utilización de materiales y se demostró que los SUDS son significativamente más económicos y utilizan una menor cantidad de materiales en su construcción.

Pero, además, los SUDS imitan en mejor manera al sistema natural de acuerdo a los siguientes criterios: contribuyen a mantener la biodiversidad y la humedad en el ambiente, contribuyen a evitar la contaminación difusa y a mantener el ciclo corto del agua y mitigar el cambio climático, favorecen la infiltración al permitir el abastecimiento de los flujos subsuperficiales y los flujos base, permiten el contacto del ser humano con la naturaleza y mediante el paisajismo se pueden convertir en elementos estéticos y en amenidades multifuncionales, según la época del año.

Se sugieren sitios de aplicación, algunos de ellos ya establecidos en los programas y planes para el manejo de aguas pluviales, se recomienda investigar estas alternativas para buscar los recursos económicos necesarios para su desarrollo e implementación, así como para investigar la remoción de contaminantes que realizan los SUDS, para ver la calidad del agua infiltrada.

Es fundamental, además, complementar estos sistemas con el desarrollo de estrategias no-estructurales, como la educación comunitaria, normativas, prevención, legislación, planeación, entre otras, con el fin de lograr su integración efectiva en la infraestructura de la ciudad.

#### REFERENCIAS

- Abellán, A. (s.f.). *Los impactos de la urbanización en el ciclo del agua*. iAgua. Recuperado el 1 de junio de 2016, de <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/impactos-urbanizacion-ciclo-agua>
- Berge, B. (2009). *The Ecology of Building Materials*. Oxford, Inglaterra: Architectural Press.
- Comisión Nacional del Agua (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado pluvial*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Tlalpan.
- Construction Industry Research and Information Association (2007). *The SUDS Manual*. Londres: CIRIA C697.
- Elliott, A.H., & Trowsdale, S.A., (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, No.22, 394-405.
- Jia, H., Tang, Y., Lu, Y., Yao, H., Yu, S.L., & Zhen, J.X. (2013). Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(9), 7915-7933.

- Molina-Aguilar, J., & Aparicio, J., (s.f.). Flood routing in rivers by artificial neural networks. *Ingeniería Hidráulica*. Mexico, 21(4), 65-86.
- Moynihan, A. (2015). *First-fluh Retention*. Recuperado el 15 de junio de 2016, de [https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server\\_6/File/Government/Flood%20Control/Rules%20and%20Procedures/Stormwater%20Detention-Retention/BrownBag\\_May\\_6\\_2015.pdf](https://webcms.pima.gov/UserFiles/Servers/Server_6/File/Government/Flood%20Control/Rules%20and%20Procedures/Stormwater%20Detention-Retention/BrownBag_May_6_2015.pdf)
- Natural Resources Defense Council (2009). "Water efficiency saves energy: reducing warming pollution through water use strategies. *Water Facts*. Recuperado el 26 de febrero de 2018, de <https://www.nrdc.org/sites/default/files/energywater.pdf>
- Novotny, V. (1995). *Pollution and Urban Stormwater Management*. Lancaster: TECHNOMIC Publ. Co.
- Novotny, V., Ahern, J., & Brown, P. (2010). *Water centric sustainable communities: planning, retrofitting, and building the next urban environment*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA) (2008). *Ficha Técnica Informativa sobre el programa de manejo integral de aguas pluviales en la Zona Metropolitana de Guadalajara*, PROMIAP. Guadalajara. Recuperado el 12 de junio de 2016, de [http://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/doctrans/ficha\\_tecnica\\_promyap.pdf](http://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/doctrans/ficha_tecnica_promyap.pdf)
- Tucci, Carlos E.M, (2007). *Gestión de Inundaciones Urbanas*. Brasil: Organización Mundial de la Salud y Organización Meteorológica Mundial. Recuperado el 19 de agosto de 2014, de [http://www.apfm.info/pdf/Urban\\_Flood\\_Management\\_Es\\_low.pdf](http://www.apfm.info/pdf/Urban_Flood_Management_Es_low.pdf)
- Sotelo, G. (1995). *Hidráulica general: fundamentos*. México: Editorial Limusa.