



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Análisis de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible  
en la Ciudad de Morelia, Michoacán: Caso de Estudio  
“Villas del Pedregal”**

□ □ **tesis**

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Presenta:

***Lenin Hernández Ferreyra***

Ingeniero Civil

Director de Tesis:

***Dr. Ezequiel García Rodríguez***

***Morelia, Michoacán, septiembre de 2017***

## **Dedicatorias y agradecimientos.**

### **A CONACYT**

Por haberme otorgado la beca de manutención para realizar mis estudios de posgrado.

### **A Dios.**

Por ser mi fortaleza, apoyo y por darme la paciencia y dedicación para culminar mis estudios y seguir preparándome día a día.

### **A mi madre. Sra. María Elena Ferreyra González.**

Por enseñarme el camino correcto en la vida, por saber guiarme y sobre todo por confiar siempre en mí. Mil gracias mamá.

### **A mi hermosa esposa Patricia Yunuen Mejía Galván**

Por acompañarme, por desvelarte conmigo, por darme el tiempo, el cariño y el apoyo en la realización de este trabajo.

### **A mis hijos. Emily Yunuen y Lenin Patricio.**

Este trabajo es para ustedes. Ustedes son las ganas de seguir adelante y de seguirme superando día a día. Gracias a sus risas, juegos y travesuras han inspirado a este humilde ser humano a ser cada día mejor. Mi amor por ustedes es infinito. Y sé muy bien que van a llegar más lejos que yo.

### **A mis hermanos. Juan, Cuauhtemoc, Xochitl, Erik y Orestes.**

Hermanos, ustedes me han enseñado a no darme por vencido, a luchar contra las adversidades. Muchas gracias por su apoyo.

### **En memoria de Mtro. Agustín Hernández Campos (†)**

Por ser mi guía, mi amigo pero sobretodo mi maestro, por ser, a pesar de haberse adelantado en esta vida, la fortaleza y el ejemplo a seguir. Por las palabras que toda mi vida he llevado presentes. Para ti, este pequeño paso más.

---

## ÍNDICE

Resumen.	6
Abstract	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE CONVENCIONALES	11
2.2. DRENAJE SOSTENIBLE	12
2.3. PRINCIPIOS DE LOS SUDS	14
2.4. PARTICIPACIÓN TEMPRANA Y EFECTIVA	15
2.5. TREN DE GESTIÓN DE LOS SUDS	15
2.6. COMPONENTES	17
2.6.1. Control de la fuente.	18
2.6.2. Canales de conducción.	19
2.6.3. Filtración	22
2.6.4. Infiltración	23
2.6.5. Retención y Detención.	26
2.6.6. Humedales.	28
3. ANTECEDENTES	30
3.1 CASO DE ESTUDIO	30
3.2 LA CIUDAD DE MORELIA.	31
4. JUSTIFICACIÓN	37
4.1 MARCO LEGAL.	39
5. HIPÓTESIS	41
6. OBJETIVOS	41
7. METODOLOGÍA	42

7.1 Resumen del gasto energético de la ciudad de Morelia.	42
7.2 Análisis de la información geográfica de la ciudad de Morelia.	45
7.3 Antecedentes de inundaciones en Morelia.	49
7.4 Sitios de oportunidad dentro del municipio de Morelia.	56
7.5 Selección de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) en Villas del Pedregal.	60
7.5.1 CONDICIONES ANTES DE LA URBANIZACIÓN.	60
7.5.2 ANALISIS DEL ESCURRIMIENTO CON URBANIZACIÓN	65
7.5.3 PROPUESTA DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE.	69
8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	79
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	84
10. REFERENCIAS	86

### ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1 Escorrentía con vegetación y sin vegetación. Susdrain.org, 2015 .....	9
Figura 2 Objetivo de los SUDS.....	14
Figura 3 Tren de manejo de los SUDS susdrain.org, 2016 .....	15
Figura 4 Estructura tipo de los techos verdes. susdrain.org, 2016.....	19
Figura 5 Ejemplo de un vado. Susdrain.org, 2016 .....	20
Figura 6 Canales. Susdrain.org, 2016.....	21
Figura 7 Estructura de bioretención. Susdrain.org, 2016 .....	23
Figura 8 Cuenca de infiltración. Susdrain.org, 2016.....	25
Figura 9 Jardín de lluvia. Susdrain.org, 2016 .....	26
Figura 10 Humedal. Susdrain.org, 2016.....	29
Figura 11 Lluvia atípica en la ciudad de Morelia (Avenida Acueducto esquina con Lázaro Cárdenas). Tomada en Junio de 2017.....	37
Figura 12 Localización de la Ciudad de Morelia.....	42

Figura 13 Distribución de la Población total del municipio de Morelia por sexos. Elaboración propia con base en Marco geo estadístico del INEGI 2010 ....	46
Figura 14 Viviendas en la ciudad de Morelia. Elaboración propia con base en Marco geo estadístico del INEGI 2010 .....	46
Figura 15 Municipio de Morelia, Mich. Elaboración propia con el Mapa Digital de México .....	47
Figura 16 Distribución de la Población total de la ciudad de Morelia por sexos. Elaboración propia con base en Marco geo estadístico del INEGI 2010 ....	48
Figura 17 Zona urbana y conurbada de la ciudad de Morelia. Elaboración propia con información del mapa digital de México (INEGI).....	49
Figura 18 Muro en el cauce del Río Grande de Morelia, fuente: La Voz de Michoacán .....	50
Figura 19 Áreas inundables de la ciudad de Morelia. Fuente: Arreygue-Rocha, (2004) .....	52
Figura 20 Incremento en el número de colonias. ....	54
Figura 21 Incremento en el número de habitantes en la ciudad de Morelia. ....	55
Figura 22 Cruce de Av. Solidaridad con Av. Camelinas .....	58
Figura 23 Cauce del Río Chiquito. Vista hacia aguas abajo. ....	59
Figura 24 Ubicación del fraccionamiento Villas del Pedregal en la carta topográfica del INEGI .....	61
Figura 25 Tipo de suelo en la zona del fraccionamiento Villas del Pedregal. Carta Edafológica del INEGI.....	62
Figura 26 datos de precipitación diaria. CLICOM, 2017 .....	63
Figura 27 Resultados del análisis de la precipitación para las condiciones antes de la urbanización (HEC-HMS).....	65
Figura 28 Precipitación en exceso y pérdidas. HEC-HMS. ....	65
Figura 29 Imagen de Satélite de Villas del Pedregal. ....	66
Figura 30 Porcentajes de cobertura en el Fraccionamiento Villas del Pedregal....	68
Figura 31 Escorrentía en la zona urbana. HEC-HMS.....	69
Figura 32 Ubicación de trincheras y zanjas de infiltración en el contorno del fraccionamiento .....	70

---

Figura 33 Ejemplo de una tira filtrante. Fuente: <a href="http://www.susdrain.org">www.susdrain.org</a> , agosto de 2016. .....	70
Figura 34 Estructura típica de un techo verde.....	71
Figura 35 Superficies construidas donde se pueden implementar los techos verdes. .....	72
Figura 36 Perspectiva de una de las calles del fraccionamiento Villas del Pedregal. .....	72
Figura 37 Ejemplo de un vado. Fuente: <a href="http://www.susdrain.org">www.susdrain.org</a> , agosto de 2016 .....	73
Figura 38 Camellón existente en una vialidad del Fraccionamiento Villas del Pedregal. ....	74
Figura 39 Ejemplo del estado de las áreas verdes en el Fraccionamiento Villas del Pedregal. Foto propia marzo de 2017. ....	75
Figura 40 Resultados del análisis con la propuesta de SuDS .....	78
Figura 41 Resultados del análisis antes de a urbanización. (HEC-HMS).....	79
Figura 42 Resultados del análisis con las condiciones actuales de urbanización (HEC-HMS).....	80
Figura 43 Análisis con la implementación de SuDS en el Fraccionamiento Villas del Pedregal. (HEC-HMS). ....	80
Figura 44 Gráfico de flujo en condiciones originales. ....	82
Figura 45 Gráfico de flujo con la urbanización (estado actual).....	82
Figura 46 Gráfico de flujo con la implementación de SuDS .....	83

---

## Resumen.

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible también llamados SuDS, son un mecanismo efectivo para la disminución de la incidencia de inundaciones, debido a que reducen el volumen de escurrimiento, a la vez que captan el agua de lluvia y la conducen de una manera más adecuada. Se llevó a cabo el análisis de los SuDS en el fraccionamiento “Villas del Pedregal” de la ciudad de Morelia en el que se observó que al implementar los SuDS se incrementa el tiempo en que el agua de lluvia escurre en las calles y el volumen de dicha lluvia se ve disminuido hasta en un 40%, lo cual contribuye a reducir el riesgo de inundaciones y sobrecarga del sistema de alcantarillado, así como el gasto energético en el bombeo de agua pluvial para su desalojo.

**Palabras clave:** Sistemas urbanos de drenaje sostenible, volumen de escurrimiento, agua de lluvia, inundaciones, energía.

## Abstract

Urban sustainable drainage systems or SuDS are an effective mechanism for reducing the incidence of flooding, because they reduce the runoff volume, once they collect rainwater, leading it in a more appropriate way. A SuDS analysis was carried out at the neighborhood of Villas del Pedregal in Morelia City. It was observed that with the SuDS implementation, the rainwater street draining time increases and its volume reduces up to a 40%. This fact contributes to the reduction of the risk of flooding and sewage system overloading, as well as to diminishing the energy spent for pumping the rainwater.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua y el manejo de las aguas residuales con frecuencia representan un alto consumo de energía; la mayoría de estas instalaciones son propiedad y son operadas por los servicios de agua municipales, lo cual representa alrededor de un 35% del consumo energético del municipio (Instituto Universitario de Investigación y Medio Ambiente, 2015). Debido a esto, se espera que al implementar sistemas de drenaje sostenible pueda haber mejoras en la eficiencia energética en la gestión del ciclo urbano del agua, lo cual se traducirá en una reducción significativa del consumo de energía. Además, datos recientes sugieren que la eficiencia energética puede reducir hasta un 60% de las emisiones de CO<sub>2</sub> vinculadas a esta actividad (Instituto Universitario de Investigación y Medio Ambiente, 2015).

El agua, así como la energía son dos elementos centrales para garantizar en los seres humanos no solo el confort, sino la supervivencia misma. Es por esto que se requiere un estudio y un manejo eficiente de ambos elementos ya que, ambos, presentan la misma problemática para poder llegar a ser sustentables: cada día incrementa la demanda de ambos, existen pocas reservas y es inaceptable el impacto ecológico que representan. Así se puede notar que ambos elementos están interconectados, de modo que la sustentabilidad de uno está ligada con la del otro.

El problema del agua radica en que a medida que incrementa la población también incrementa la urbanización, y debido a esto es necesario proporcionar los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a esas nuevas urbanizaciones. Dichas edificaciones hacen que el suelo sea menos permeable y en algunos casos se construyen en zonas de recarga de acuíferos, lo que genera problemas de inundaciones y catástrofes por asentamientos humanos irregulares, además de la producción de la energía necesaria y las correspondientes emisiones de CO<sub>2</sub> que se generan.

En los últimos años, es preocupante el cambio que han sufrido las tendencias de producción y consumo energético en México pudiendo el país convertirse en un importador neto de energía. Entre el año 2000 a 2011 el crecimiento en el consumo

de energía creció a una tasa anual de 2.0% mientras que el producto interno bruto (PIB) creció apenas en un orden de 1.8% (SENER, 2016). De manera análoga, la producción de energía primaria en el País se redujo a una tasa anual de 0.3% (SENER, 2016). La Estrategia Nacional de Energía 2014-2028 presenta un nuevo modelo energético que incluye la eficiencia energética como un área prioritaria de transformación para ayudar a reducir la vulnerabilidad del país al reducir la demanda de energía, mientras que ayuda a reducir los gases de efecto invernadero en todos los sectores y niveles de gobierno, incluyendo a los gabinetes locales (SENER, 2016). En el mundo las ciudades son los principales motores del crecimiento económico, en lo que concierne a México, según datos de la Secretaría de Energía (SENER, 2016) 93 ciudades, con más de 100,000 habitantes cada una, representan el 88% del Producto Interno Bruto (PIB) del país.

Por lo anterior, es importante que en las ciudades como Morelia, se cuide de la eficiencia energética, ya que las ciudades en México en un futuro experimentarán un crecimiento demográfico y económico que como consecuencia traerá un incremento en el consumo de energía. Esto conllevará a que los municipios enfrenten una mayor presión para poder llevar a la sociedad los servicios básicos públicos con calidad y asequibles en los diferentes sectores como son el transporte, la energía, el agua y el saneamiento, por nombrar algunos (SENER, 2016). Es en este punto clave donde los sistemas urbanos de drenaje sostenible juegan un papel fundamental ya que, implementados de la manera adecuada, pueden coadyuvar al ahorro del gasto energético del municipio de Morelia, reduciendo el gasto en materia de distribución de agua potable, bombeo y tratamiento de aguas servidas e incluso en la utilización de sistemas de calefacción en edificios, ya sea de uso privado o en edificios de gobierno, con esto, se puede tener un mayor confort y una mejor imagen urbana.

## SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SuDS)

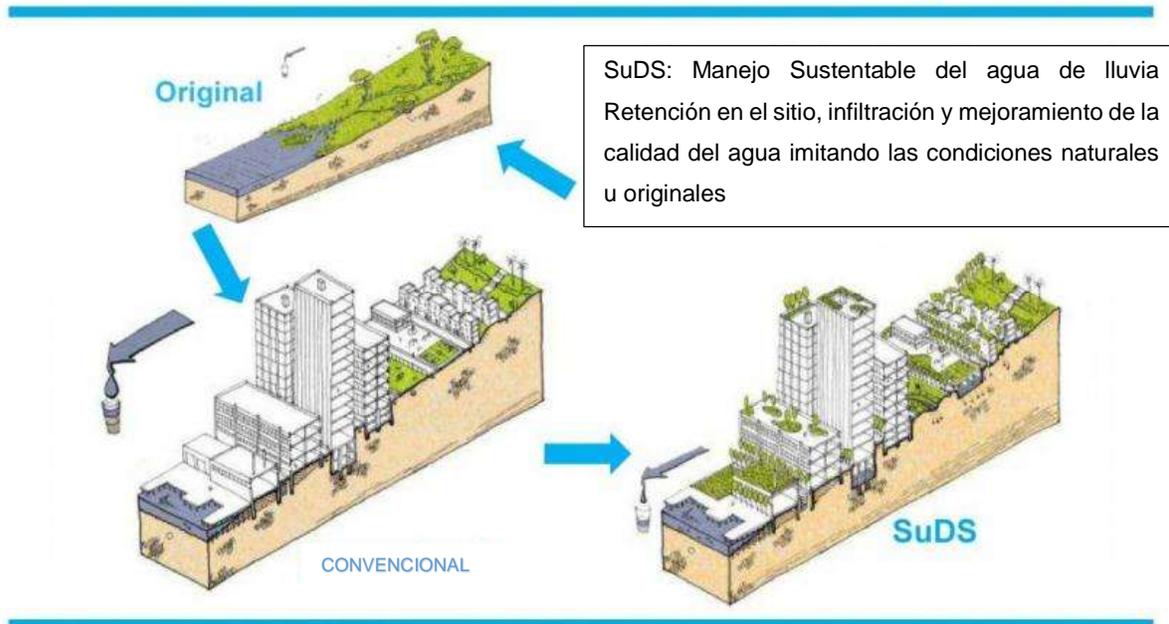


Figura 1 Escorrentía con vegetación y sin vegetación. Susdrain.org, 2015

El objetivo de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SuDS), es imitar o tratar de igualar las condiciones naturales de escorrentía e infiltración naturales del terreno antes de su urbanización (Figura 1), y con esto reducir los escurrimientos que se presentan y pueden causar problemas en las viviendas, grandes catástrofes así como inundaciones; y de igual manera se reduce la energía necesaria para tratar el agua o en los sistemas de calefacción en los hogares contribuyendo a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y, por lo tanto, a la disminución de los efectos del mismo en el cambio climático.

El problema energético se basa en tres aspectos principales a resolver en la búsqueda de la sustentabilidad: 1) ¿cómo resolver el suministro de energía para una demanda en constante crecimiento?, 2) ¿Cómo hacer frente a la limitada cantidad de recursos de combustibles fósiles que existen? y 3) ¿Cómo reducir el impacto ambiental generado en todos los puntos del sistema de energía: generación, distribución, almacenamiento y uso? (liama.upv.es, 2016).

---

## 2. MARCO TEÓRICO

Hablar del tema del cambio climático implica una serie de factores que influyen en el. Hablando de factores, según la ONU en el Estado de las ciudades de América Latina (2012), América Latina y el Caribe está considerada como la región más urbanizada del mundo. De igual modo, es aquí en América Latina donde se ha trabajado de manera más intensa en soluciones que resulten innovadoras para poder afrontar los diversos retos que la gestión de una ciudad supone.

Uno de los factores en donde el cambio climático ha influido es en el cambio del régimen de lluvias, aunado al crecimiento demográfico y a la necesidad de construcción de viviendas, es decir, la mala planeación urbana, esto ha dado como resultado la “impermeabilización” de las áreas de escorrentía natural y de infiltración a los acuíferos. Esto ha traído consigo entre otras cosas, que la incidencia y la ocurrencia de inundaciones y problemáticas asociadas a las mismas, se vean incrementadas en los últimos años. Es importante reconocer que ha habido esfuerzos para resolver dichas problemáticas, teniendo un enfoque más sustentable. Es en este nivel donde los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible juegan un papel fundamental.

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible comprenden un amplio espectro de soluciones que permiten afrontar el planteamiento, diseño y gestión de las aguas pluviales dando tanta importancia a los aspectos medioambientales y sociales como a los hidrológicos e hidráulicos. Además, los SUDS pueden ser utilizados como una alternativa a los sistemas de drenaje convencional o también pueden ser utilizados en combinación con estos.

---

## **2.1. PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE DRENAJE CONVENCIONALES**

Durante el proceso de construcción de las infraestructuras de drenaje y saneamiento de una ciudad se pueden identificar varias fases. En primera instancia se busca la manera de canalizar y controlar el agua residual y posterior a esto se encauzan los escurrimientos producidos por el agua de lluvia para poder evitar o limitar el riesgo de sufrir inundaciones. Lo anterior ha dado lugar a los sistemas de saneamiento y drenaje convencional de las ciudades, basándose en la utilización de colectores cuyo objetivo principal es evacuar lo antes posible los escurrimientos generados en épocas de lluvia hacia el medio receptor. Una vez que a priori han sido resueltos estos problemas aparece uno más, el de la calidad de los escurrimientos urbanos en época de lluvias y el impacto que el vertido de las mismas genera en el medio receptor. Debido a las constantes investigaciones, hoy en día sabemos que el agua de lluvia no siempre es una fuente limpia de abastecimiento de agua, sino por el contrario es una fuente importante de contaminación. El problema de la contaminación del agua crece aún más si la red es unitaria para aguas pluviales y residuales.

El crecimiento de las zonas impermeables en las ciudades modifica los flujos naturales del ciclo hidrológico, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. La reducción de espacios vegetados reduce en primera instancia la intercepción natural y la evapotranspiración. El aumento de la impermeabilidad redundante en una reducción de la infiltración. Como consecuencia de todo ello, se generan volúmenes de escorrentía netamente mayores, y además, se aceleran los tiempos de respuesta, por lo que aumenta el riesgo de inundaciones.

Las actividades humanas generan, tanto en la atmósfera como en la superficie de las cuencas urbanas, una amplia gama de contaminantes: sedimentos, materia orgánica, nutrientes, hidrocarburos, elementos patógenos (bacterias y virus), metales, pesticidas, entre otros. El origen de esta contaminación corresponde a zonas muy amplias y de difícil delimitación, por lo que se habla de contaminación difusa. Durante los eventos de precipitación, la contaminación acumulada en las

superficies de contacto y escurrimiento es lavada y arrastrada hacia la red de colectores. Y si la red es unitaria (como ocurre en la mayoría de los sistemas de drenaje), a lo anterior hay que añadir el efecto del lavado de los sedimentos que durante el tiempo seco se han ido depositando en la red como consecuencia del tránsito de las aguas residuales. El impacto en el medio receptor de tales escorrentías genera por tanto problemas graves como la caída del oxígeno disuelto (que puede provocar la mortandad de especies y la reducción de la oxidación natural de elementos tóxicos), el incremento de las concentraciones de nutrientes (con el consiguiente riesgo de eutrofización), la contaminación por agentes patógenos (que puede derivar en problemas de salud pública, por ejemplo, en aguas de baño) o la acumulación de elementos tóxicos (que puede tener consecuencias en la cadena trófica, y por otra parte, aumenta los costos de potabilización del agua). En definitiva, el problema de la contaminación de las escorrentías urbanas y de su vertido directo al medio natural es una cuestión grave que merece la misma atención que en su día requirió el tratamiento de las aguas residuales. No obstante, la naturaleza intermitente del proceso de lluvia induce a encontrar soluciones que respondan correctamente con un funcionamiento discontinuo.

## **2.2. DRENAJE SOSTENIBLE**

Los Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SuDS) son técnicamente considerados una secuencia de manejo de prácticas, control de estructuras y estrategias diseñadas para administrar de una manera eficiente y sustentable el drenaje de agua de lluvia mientras se minimiza la contaminación, así como el impacto que tiene el manejo de la calidad de agua que se vierte en los cuerpos de agua locales.

Los SuDS son sistemas más sustentables que los sistemas tradicionales debido a que:

- Administran los volúmenes de escurrimiento y caudales de superficies revestidas, lo que reduce la manera en que la urbanización influye en las inundaciones.

- Protegen y mejoran la calidad del agua (reduciendo la contaminación existente en la escorrentía).
- mantener los regímenes de flujo naturales en los cauces o embalses naturales.
- Son amigables con el ambiente y a su vez con las necesidades de la comunidad.
- Proveen de un agradable y atractivo hábitat para la vida silvestre en los cauces urbanos.
- Proporcionan medios adecuados para que se lleve a cabo la evapotranspiración ya sea en la vegetación o el agua superficial.
- Mejoran y promueven la recarga natural de los acuíferos.
- Crean lugares más agradables para vivir, trabajar y para las actividades recreativas.

Los SuDS también pueden permitir nuevos desarrollos en áreas donde los sistemas de alcantarillado existentes son casi a plena capacidad, lo que permite el desarrollo dentro de las áreas urbanas existentes.

El drenaje sostenible se está alejando de la forma de pensar tradicional de diseñar solamente para inundaciones, para equilibrar el impacto urbano del drenaje en inundaciones y la gestión de la calidad del agua y del equipamiento. En la Figura 2 se observa que la calidad del agua, la cantidad de agua y la biodiversidad son elementos que al trabajar en conjunto contribuyen a mejorar tanto la cantidad de agua, como la calidad de agua y a su vez que este directamente relacionada con la cantidad de biodiversidad que existe en un sitio.

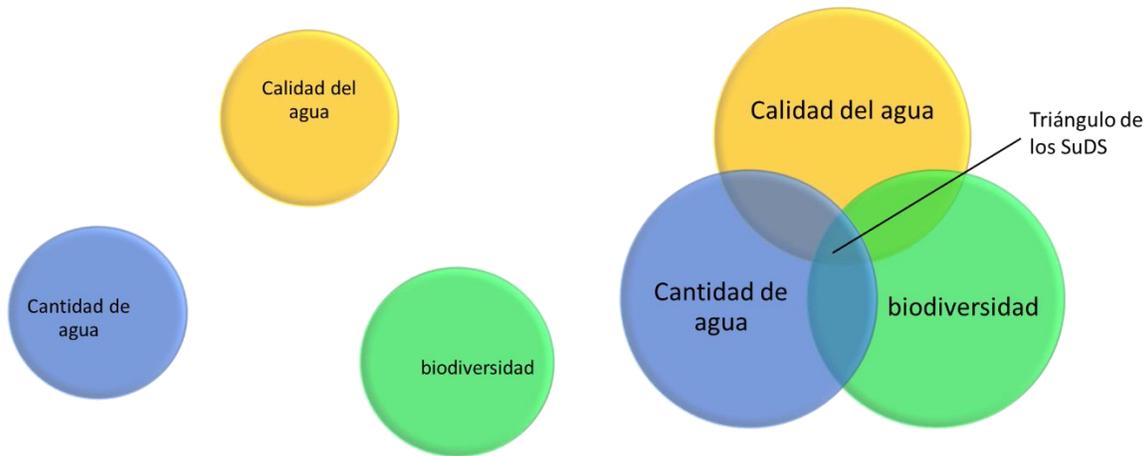


Figura 2 Objetivo de los SUDS.

El drenaje sustentable es un concepto que involucra términos ambientales y diversos factores sociales en las decisiones acerca del drenaje. Esto tiene en cuenta la cantidad y la calidad de la escorrentía, así como la amenidad y el valor estético de la superficie del agua dentro del entorno urbano. Muchos de los sistemas de drenaje urbanos convencionales pueden causar problemas de inundaciones, contaminación y daños al ambiente y no está demostrado que sean sustentables ni que tengan un contexto amigable con el medio ambiente ni acorde con los desafíos del cambio climático y la urbanización.

### 2.3. PRINCIPIOS DE LOS SUDS

Los Sistemas de Drenaje Sostenible corresponden a un distanciamiento del enfoque tradicional de los sitios de drenaje. Existen principios clave que influyen en el proceso de planificación y diseño que permite a los SUDS imitar las características del drenaje natural a través de:

- Almacenamiento de la escorrentía y liberación lenta (atenuación).
- Permitir que el agua penetre nuevamente en el suelo (infiltración).
- Permitir un transporte lento del agua a través de las superficies (transportación).
- Filtración de contaminantes.
- Permitir a los materiales la sedimentación natural mediante un control en el flujo del agua.

## 2.4. PARTICIPACIÓN TEMPRANA Y EFECTIVA

Cuando los sistemas de drenaje son considerados desde las etapas tempranas, desde la selección del sitio y el diseño, son más fáciles de integrar dentro de otros acontecimientos que influyen en otros aspectos del sitio (como el diseño, la disposición y la función) así como la reducción de las áreas impermeables en la medida que esto sea posible.

Para poder llevar a cabo un diseño exitoso es necesario conocer y apegarse a las políticas desarrolladas por la autoridad local de planeación y de igual manera es importante tener en cuenta la gestión local de riesgo de inundaciones y los documentos que a ella se asocien.

Una participación temprana eficaz con las partes interesadas debe de ayudar a construir SuDS que sean espacios multifuncionales tales como estacionamientos, patios vegetados, jardines, zonas ajardinadas, caminos, plazas y espacios comunales. En otras palabras, la utilización de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible debe dar una mejor rentabilidad y una efectiva integración en la construcción de mejores lugares para vivir y desarrollarse.

## 2.5. TREN DE GESTIÓN DE LOS SUDS

En la Figura 3 se puede observar el tren de gestión típico de los Sistemas urbanos de drenaje sostenible (llamado a menudo como tren de tratamiento). De manera análoga a como se llevaría a cabo en una cuenca natural, las técnicas de drenaje pueden ser utilizadas en serie para poder cambiar las características del flujo, así como la calidad de cada una de las etapas de la escorrentía.

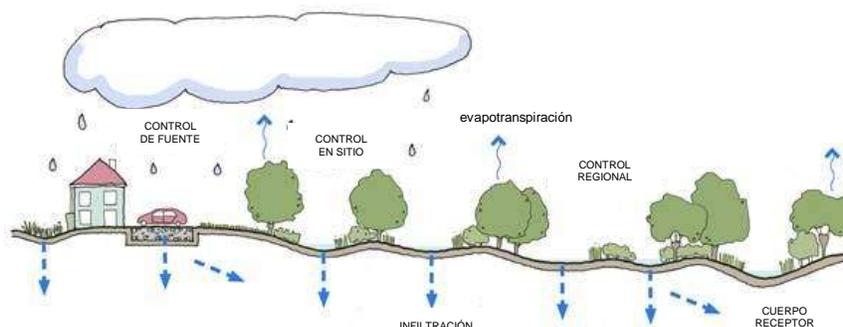


Figura 3 Tren de manejo de los SUDS ([susdrain.org](http://susdrain.org), 2016)

El tren de manejo comienza con la prevención (prevenir el exceso de escorrentía reduciendo las áreas impermeables), o también con buenas medidas de prevención que reduzcan la contaminación; y continua mediante el control de fuentes locales a lo largo de los cauces generando controles regionales.

La escorrentía no debe pasar estrictamente por todas las etapas del tren de gestión. Podría fluir directamente hasta un sitio de control, pero como principio general conviene hacer frente a la escorrentía local regresando el agua a su sistema de drenaje natural tan cerca de la fuente como sea posible.

Cabe mencionar que únicamente si no es fácil manejar el agua en el lugar, ésta se debe transportar en un régimen laminar hasta otro sitio. La principal causa de esto puede ser que el agua requiera algún tipo de tratamiento adicional antes de su disposición o que las cantidades de escorrentía excedan las capacidades del sistema de drenaje natural en ese punto. En este caso los flujos excesivos deben ser encausados para ser tratados fuera.

Se deben evitar las descargas directas de tuberías en humedales o estanques. El correcto diseño de los SUDS requiere de un balance entre diferentes opciones que a menudo son dependientes de cada uno de los riesgos y beneficios asociados a cada línea de acción o técnica que se quiera implementar. Los riesgos que tiene una zona de inundación deben estar balanceados con los costos de protección de esta para diferentes grados de inundación.

El concepto de tren de gestión promueve una división de la zona que se pretende sea drenada en sub-cuencas, con diferentes características de drenaje y diversos usos de suelo, pero cada uno siguiendo una estrategia de drenaje. El tratar el problema del agua a nivel local no solo reduce la cantidad que tiene que ser administrada en cualquier punto, sino que también reduce la cantidad y necesidad de transportar el agua fuera de ese sitio.

Al realizar la división de las cuencas en otras más pequeñas hay que mantener la perspectiva de como esto puede afectar la gestión de las cuencas en el ciclo hidrológico natural.

---

## 2.6. COMPONENTES

Los drenajes sostenibles incluyen una variedad de componentes, cada uno de ellos enfocado de diferente manera en la gestión de los flujos, volúmenes, calidad del agua, así como el proporcionar beneficios recreativos y de biodiversidad.

Los SuDS no sólo son los tradicionales sumideros, estanques o humedales sino que están formados por un conjunto de componentes que trabajan de diferentes maneras para drenar diferentes sitios. La forma de desempeño de los SuDS es muy diversa: pueden infiltrar agua en el suelo, transmitir flujo a un curso de agua, también puede existir un almacenamiento y atenuar la velocidad de los flujos de agua. Es muy frecuente que los SuDS utilicen una combinación de los diferentes procesos y componentes para que los mecanismos sean más efectivos.

Al seleccionar los componentes de los SuDS es necesario considerar completamente los lugares oportunos para realizar el diseño, así como los sitios con limitaciones. Es frecuente que una combinación de diferentes esquemas ofrezca los mejores resultados.

Existe una variedad de maneras de dividir y presentar los componentes de los SuDS y a menudo existe cierta superposición. De acuerdo con susdrain.org, (2016) podemos clasificar los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible de la siguiente manera:

- Control de la fuente.
- Canales de conducción.
- Filtración.
- Infiltración.
- Retención y detención.
- Humedales.
- Entradas, salidas y estructuras de control.
- Prácticas no estructurales: entre éstas se destacan actividades como el control de la disposición de desechos del hogar que pudieran tener un manejo especial, como grasas, aceites, cloro, entre otros químicos utilizados

en la limpieza diaria, exigencia de orden y limpieza en espacios comerciales y a nivel industrial, la modificación del uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas, la inclusión de políticas de manejo de escombros, el control de la disposición de residuos animales, el correcto mantenimiento a cuencas, caminos, calles, estacionamientos y zanjas, la detección y eliminación de descargas ilícitas, programas educativos y de asistencia, manejo del drenaje de aguas pluviales y promoción de desarrollos de bajo impacto y del ordenamiento territorial. (United States. Environmental Protection Agency, 1999; United States. Environmental Protection Agency, 2000; Woods-Ballard, Kellagher, *et al.*, 2007b).

### **2.6.1. Control de la fuente.**

La inclusión del control de la fuente en los esquemas de los SuDS es uno de los principios más importantes de los mismos. El control de la fuente debe de ser aguas arriba de cualquier estanque, humedal o algún otro componente de los SuDS. El control de la fuente influye en gran medida a proporcionar almacenamiento, lo cual ayuda a manejar y tratar algunos de los eventos más frecuentes, pero de pequeña magnitud, así como contaminantes con tamaños de partícula al menos de 5 mm, pero máximo 10 mm.

En su mayoría los componentes de control de origen se encuentran en las propiedades privadas o en áreas de autopistas. Su objetivo principal es el de gestionar las precipitaciones cerca de donde caen y con esto no permitir que se conviertan en un problema en otros lugares. Entre los principales tipos se presentan los siguientes:

- Techos verdes (Figura 4).
- Cosecha de agua de lluvia.
- Pavimentos permeables.

Los controles de fuente tienden a maximizar la permeabilidad en un sitio en específico, lo cual promueve la atenuación, tratamiento e infiltración y reduciendo con esto la necesidad de transporte fuera del sitio. Los techos verdes logran un

aumento de la cantidad de suelo en las ciudades, así como la cubierta vegetal en los techos de las viviendas, lo que aumenta la atenuación y la evapotranspiración, ayudando a gestionar los flujos, así como proporcionar beneficios como confort térmico y el incremento de la biodiversidad, entre otras cosas.

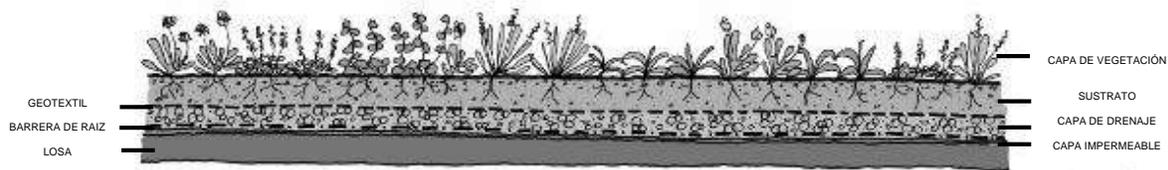


Figura 4 Estructura tipo de los techos verdes. (susdrain.org, 2016)

Los pavimentos permeables permiten que el agua penetre en la sub-base, reteniendo de manera temporal, el agua antes de que llegue al suelo (durante este proceso existe una mejora en la calidad del agua). Los sistemas de captación de agua de lluvia en el hogar proporcionan oportunidades para recoger, almacenar y utilizar el agua proveniente de las precipitaciones.

Algunos otros controles en la fuente son tiras de filtro, sumideros, desagües y cunetas vegetadas, las cuales se construyen en general a lo largo de carreteras, caminos y jardines de lluvia que pueden ser utilizados como control de fuente.

### 2.6.2. Canales de conducción.

Este componente de los SuDS está relacionado con la transferencia de la escorrentía de aguas superficiales, lo cual es esencial a lo largo de los componentes del tren de gestión. En este tipo de componentes hay una variedad de enfoques que se pueden utilizar; subterránea a través de tuberías con un bajo grado de control y tratamiento de la calidad del agua. Otra opción es a través de canales con vegetación en la superficie que proporciona un tratamiento ligero y atenuación, o por medio de rollos que requieren mayor nivel de diseño e ingeniería. La preferencia es que la entrega sea transportada a través de canales o zanjas con vegetación. La conducción sin control a un punto de descarga en el medio ambiente no es recomendable.

También serán necesarias rutas de flujo superficial para poder transmitir y controlar las inundaciones con seguridad durante eventos extremos. En general, mientras mayor sea el número de componentes utilizados en serie, mayor será la probabilidad de que haya mayor rendimiento y el riesgo de que el sistema falle será menor.

Los componentes incluidos en esta selección incluyen:

- Vados (Figura 5).
- Canales (Figura 6) y tuberías.

Los vados son en general canales poco profundos recubiertos de vegetación que se utilizan para recoger y/o mover el agua de escorrentía. Los taludes poco profundos y el fondo plano superficial indican que la mayor parte del tiempo el agua fluye formando una capa delgada, algunos de ellos pueden permitir el drenaje o la infiltración mediante la utilización de tubería perforada. Por tal motivo, los vados pueden dar un poco de almacenamiento y filtración.

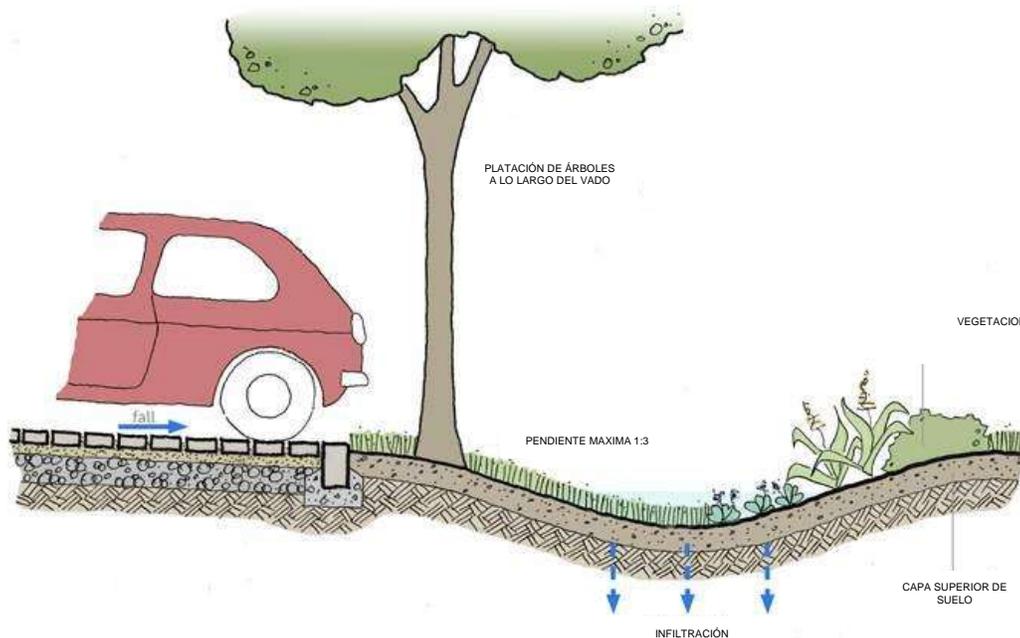


Figura 5 Ejemplo de un vado. (Susdrain.org, 2016)

Los canales y tuberías son superficies abiertas para transportar el agua con bordes duros como guarniciones o tuberías de concreto hidráulico, que son comúnmente

construidos en ciudades, pueblos y aldeas. La sección transversal de estos canales varía para adaptarse al entorno urbano y también pueden contener vegetación apropiada, diseñados para proporcionar tratamiento al agua. En desarrollos urbanos de alta densidad o en situaciones de reconstrucción pueden ser un método efectivo de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y si son diseñados apropiadamente pueden actuar como un pre tratamiento para remover sedimentos antes de que el agua sea enviada a otros componentes de los SuDS.

Los canales de tratamiento recogen el agua, le reducen la velocidad y pueden separar el limo y aceites que contenga la escorrentía. La salida debe estar diseñada para actuar como un mini separador de aceite, por diferencia de densidades, lo que permite al canal ser muy eficaz en el tratamiento de la contaminación del agua proporcionándole un pretratamiento.

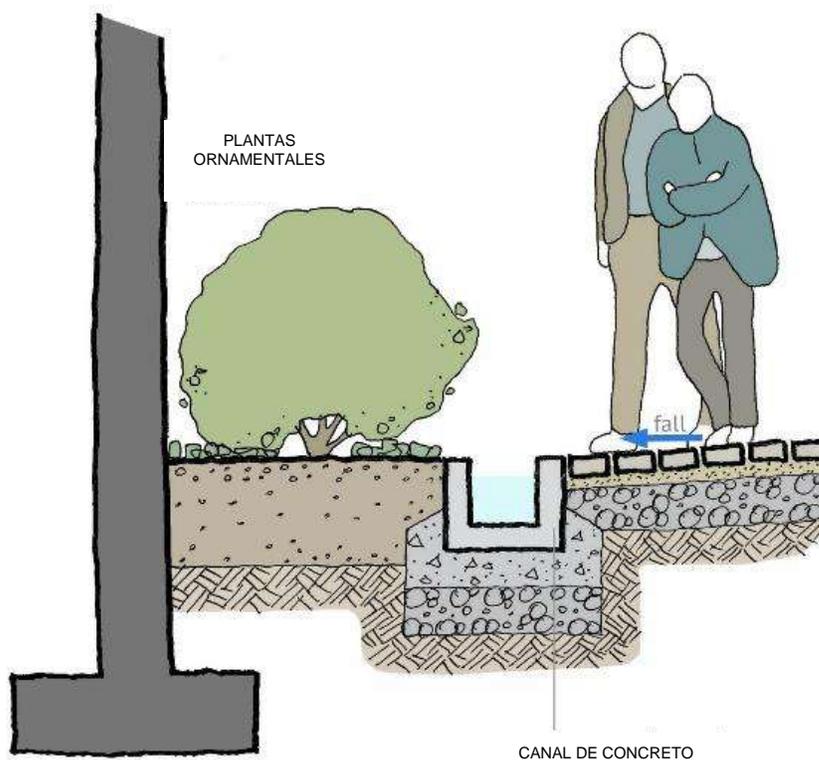


Figura 6 Canales. (Susdrain.org, 2016)

---

### 2.6.3. Filtración

La filtración y la eliminación de los sedimentos u otras partículas de la escorrentía de las aguas superficiales es uno de los principales métodos de tratamiento en el drenaje sostenible. Esto se realiza mediante la captura en el suelo o terreno natural o en una superficie formada por agregados, en las plantas, o mediante capas de geo textil dentro de la construcción. La ubicación de cualquier superficie de filtración dependerá de la estructura de cada SuDS en particular. Los componentes que se incluyen dentro de la filtración son:

- Tiras filtrantes.
- Trincheras filtrantes.
- Áreas de bioretención (Figura 7).

Las tiras filtrantes son áreas de pasto con pendientes suaves en donde el agua fluye y pasa a través de él, por lo general hacia otro componente como un canal de drenaje o filtro de desagüe. Su propósito principal es el de eliminar cualquier sedimento que contenga la escorrentía de modo que no obstruya los componentes aguas abajo. Las trincheras filtrantes tienen una función similar a los anteriores y son excavaciones poco profundas rellenas de grava para el almacenamiento temporal y que permitan la filtración de la escorrentía hacia el subsuelo.

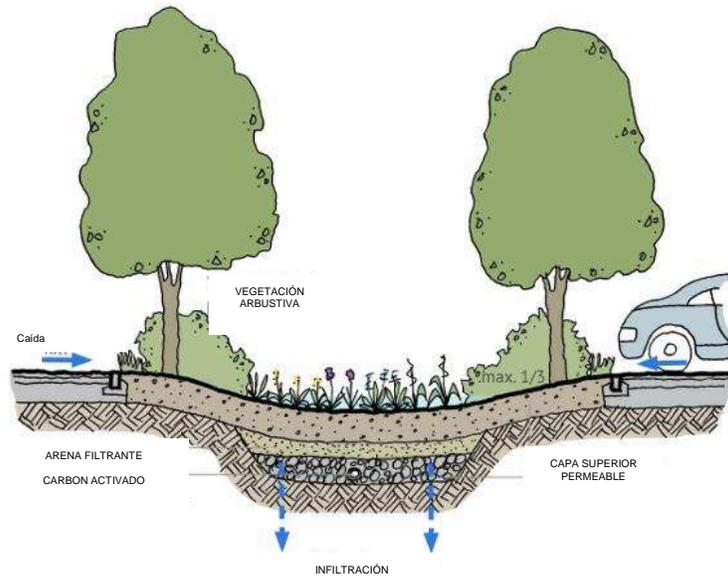


Figura 7 Estructura de bioretención. (Susdrain.org, 2016)

Las áreas de bioretención son zonas vegetadas con un diseño ingenieril especial que incluye capas de arena en las cuales se filtran los contaminantes de la escorrentía que están normalmente asociados a las carreteras. Uno de los puntos a favor de las áreas de bioretención es que tienen un alto valor estético y propician mayor biodiversidad ya que pueden ser cultivadas para adaptarse al entorno local lo que genera un paisaje más atractivo.

A menudo las áreas de bioretención son depresiones en el suelo donde hay oportunidades de almacenamiento y atenuación. Las capas de filtración se construyen por lo general mediante un sistema de tuberías perforadas que en su caso permitan la filtración. Otra medida para la filtración es la colocación de árboles, lo cual se integra de manera amena al paisaje urbano y otras zonas de dominio público.

#### 2.6.4. Infiltración

Los componentes de infiltración se utilizan para capturar el escurrimiento de las aguas superficiales y dejar que se infiltre para que posteriormente mediante un proceso de filtración pueda ser drenada a través de la capa del subsuelo, antes de

regresar al acuífero. Los componentes de infiltración pueden ser incorporados dentro del tren de gestión de los SuDS.

Existe una serie de consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta al utilizar los componentes de infiltración. Tener especial cuidado cuando se utilicen componentes de infiltración cerca de edificios. Debe haber un análisis de las zonas protegidas para que no haya afectaciones en las aguas subterráneas y revisar la calidad del agua antes de la infiltración. Debe existir un tratamiento previo antes de ser vertidas en las aguas superficiales.

Cabe mencionar que se debe llevar a cabo una evaluación de riesgo cuando se utilizan componentes de infiltración en zonas contaminadas que no están localizadas en áreas de suelos impermeables (*i.e.* los componentes deben estar localizados a 1.0 m por encima del nivel freático de la temporada de lluvias). Las investigaciones deben llevarse a cabo sitio por sitio dentro de un desarrollo. Si el suelo en un sitio no es adecuado, no significa que en toda el área no existan zonas de infiltraciones. Es importante saber que con una consulta acción y un diseño adecuado de SuDS, se puede utilizar cualquier sitio para realizar la infiltración. Los componentes de infiltración en esta sección son:

- Sumideros.
- Zanjas de infiltración.
- Cuencas de infiltración (Figura 8).
- Jardines de lluvia.

Los sumideros son los dispositivos de infiltración más comunes en el Reino Unido (Susdrain.org, 2016). Dichos dispositivos permiten almacenar la escorrentía desde una casa hasta un conjunto habitacional y permitir su infiltración eficaz en el suelo circundante.

Una zanja de infiltración por lo general está diseñada para promover la infiltración de agua de la superficie al suelo. Una cuenca de infiltración, como la que se muestra en la Figura 8, es una cuenca seca o depresión diseñada para promover la infiltración de la escorrentía de las aguas superficiales en el suelo. La vegetación

contenida en las cuencas de infiltración debe ser capaz de soportar periodos de encharcamiento y periodos de sequía y, de ser posible, mantener o mejorar el espacio poroso existente en los suelos subyacentes a través de sistemas de raíces profundas.

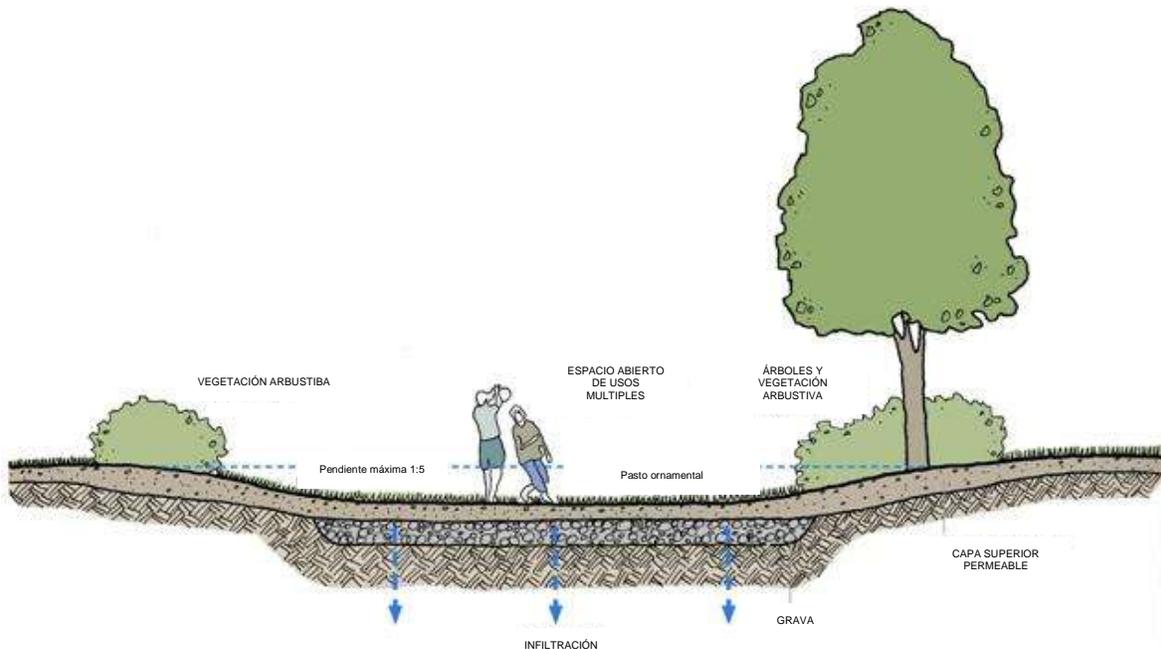


Figura 8 Cuenca de infiltración. (Susdrain.org, 2016)

Un jardín de lluvia como el que se muestra en la Figura 9, es muy similar a un área de bioretención, con una menor calidad en su construcción y no proporciona un alto nivel de tratamiento al agua. Un jardín de lluvia se utiliza principalmente para manejar la escorrentía de techos y otro tipo de áreas relativamente no contaminadas.

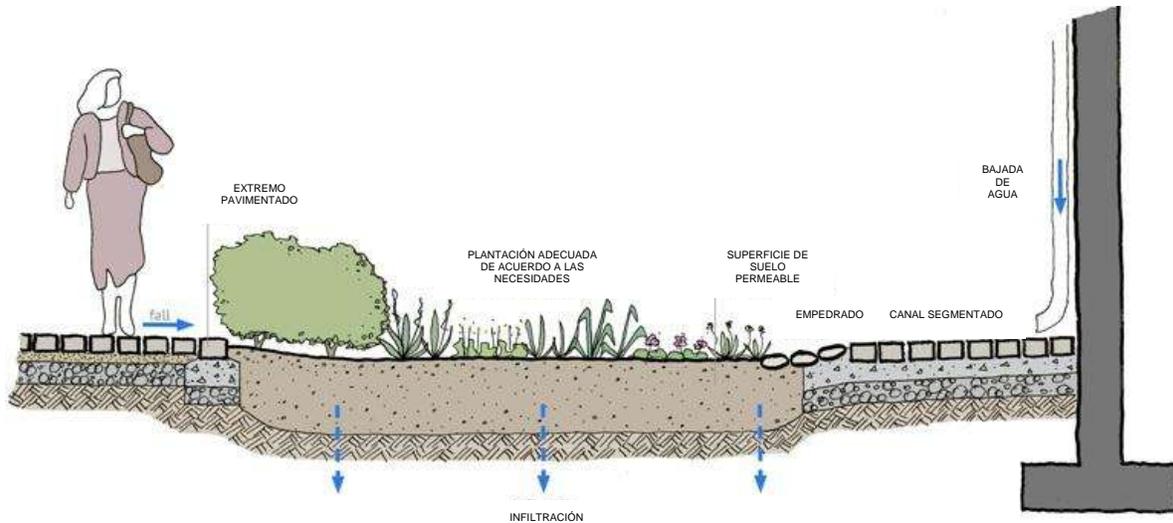


Figura 9 Jardín de lluvia. (Susdrain.org, 2016)

### 2.6.5. Retención y Detención.

Estos son componentes de los SuDS diseñados para proporcionar almacenamiento, ya sea a través de la retención de la escorrentía de las aguas superficiales o la atenuación a través de la detención de la escorrentía de las mismas. La retención se proporciona principalmente en la superficie a través de estanques y de manera subterránea a través de tanques o más comúnmente tanques geo celulares. La detención se proporciona a menudo mediante las cuencas de detención.

El almacenamiento de retención dentro de estanques ayuda a gestionar el riesgo de inundaciones y también es útil en la prestación de tratamiento de agua. Sin embargo, no deben de existir componentes o etapas de tratamiento aguas arriba antes de ser transportadas a los estanques o humedales.

La retención provocada por los tanques es a menudo útil para atenuar el flujo máximo de un evento de lluvia, y también permite que la filtración y la sedimentación tengan lugar, lo que contribuye a la mejoría de la calidad del agua. Los componentes de retención y detención se clasifican en:

- Cuencas de detención.
- Estanques de retención.
- Drenaje geocelular.

Cuando el esquema de los SuDS está bien diseñado, la mayor parte del tratamiento del agua se da en las fases de control del sitio y no en el almacenamiento, es decir aguas arriba del sistema. Si estos estanques operan de manera óptima cuando se gestionan los flujos, proporcionarán un pulido final para eliminar cualquier contaminación. El limo también debe ser eliminado en la segunda fase antes de entrar en un almacenamiento geocelular.

Las cuencas de detención o estanques, son áreas abiertas en general cubiertas con vegetación pequeña que se encuentran normalmente secos, excepto después de grandes eventos de tormenta. Durante los eventos de lluvias fuertes se utilizan para proporcionar almacenamiento temporal del exceso de agua de lluvia durante un corto tiempo. Las cuencas de detención o estanques pueden ser diseñados para ser multifunción. Para que haya una operación eficaz se requiere que los sedimentos y escombros sean retirados aguas arriba.

Los estanques de retención son áreas abiertas de agua poco profunda, diseñados para que puedan adaptarse a las precipitaciones y proporcionar almacenamiento temporal al exceso de agua. Los niveles de agua aumentan temporalmente cuando llueve, pero existe siempre una reserva permanente de agua. El almacenamiento permanente dentro del diseño de los estanques de retención es lo que los diferencia de las cuencas de detención.

Los tanques geo celulares con una alta relación de vacíos, han comenzado a reemplazar a las tuberías subterráneas o tanques que normalmente almacenan agua. También pueden ser utilizados para transmitir o infiltrar el escurrimiento del agua en el suelo, pero no proporcionan un tratamiento para mejorar la calidad del agua. El almacenamiento geocelular utilizado por sí solo no se podría considerar como esquema SuDS, para que tenga una calidad adecuada debe incorporarse un mecanismo de control de la fuente.

---

### **2.6.6. Humedales.**

Los humedales son regiones que están densamente vegetadas, son cuerpos de agua que utilizan la sedimentación y filtración para proporcionar el tratamiento de la escorrentía de las aguas superficiales.

Los humedales (Figura 10) consisten en general en una zona de entrada (cuenca de sedimentos), una zona de macrófitos, que es una zona poco profunda con vegetación densa, y un canal de derivación de alto flujo o canal de demasías. Suele ser un terreno pantanoso con amplia vegetación propia de laguna del lado del humedal o lo que comúnmente se denomina vegetación hidrófita.

Siempre que sea posible los humedales deben ser la última etapa del tren de gestión de los SuDS y la última etapa de tratamiento, de lo contrario existe el riesgo de una extensa sedimentación dentro del mismo causada por los elementos contenidos en la escorrentía. Los humedales eliminan sedimentos finos, metales y pequeñas partículas de nutrientes disueltos. Los humedales tratan principalmente la escorrentía contaminada, proporcionan una atenuación e integran biodiversidad y amenidad.

Los humedales pueden ser construidos en una gran variedad de escalas. En áreas altamente urbanizadas los humedales pueden tener bordes duros formados con concreto hidráulico (i.e. guarniciones de concreto, bordillos o lavaderos) o simplemente formar parte de los paisajes urbanos o algunos otros tipos de jardines. Deben ser diseñados de acuerdo al tamaño de la cuenca para contribuir el tratamiento del agua.

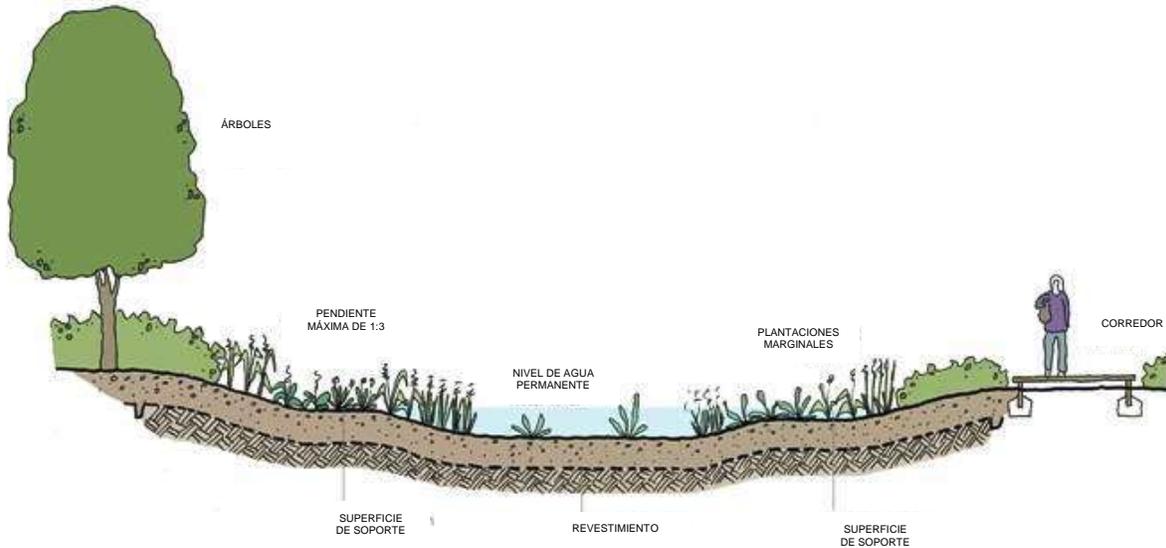


Figura 10 Humedal. (Susdrain.org, 2016)

Los componentes en los niveles anteriores del tren de gestión permiten controlar el flujo y la cantidad de sedimentos que llegan a los humedales y lagunas que pulirán el tratamiento y gestión del agua. Esto se consigue asegurando que los flujos de agua sean lentos a través de la zona húmeda durante un periodo prolongado de tiempo.

---

### **3. ANTECEDENTES**

En el presente proyecto se propone hacer una evaluación prospectiva de las ventajas que los sistemas de drenaje sostenibles pueden representar en la ciudad de Morelia, Michoacán, utilizando herramientas de apoyo a la toma de decisiones para la implantación de estos sistemas poco difundidos en México, a diferencia de lo que ha ocurrido al respecto en países nórdicos y anglosajones.

Por ejemplo, en España existe el programa de implementación de recursos como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible denominado E<sup>2</sup>STORMED el cual es un proyecto desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia. El programa pretende mejorar la eficiencia energética en la gestión del ciclo del agua en zonas urbanas y edificios mediante la utilización de sistemas innovadores de gestión del agua de lluvia, como Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS). Estos sistemas representan una solución eficiente económicamente y flexible para los sistemas de drenaje que puede ayudar a reducir el calentamiento global y disminuir el gasto en consumo energético. El proyecto E2STORMED promueve la implementación de tecnologías innovadoras en la gestión del agua mediante el desarrollo de herramientas de gestión integrada que serán adaptadas, testeadas y mejoradas para ciudades mediterráneas. Este proyecto está liderado por el grupo del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia e involucra a ocho socios de España, Italia, Reino Unido, Croacia, Montenegro, Grecia y Malta (Programa E2STORMED).

#### **3.1 CASO DE ESTUDIO**

El desarrollo del presente trabajo se llevará a cabo en la ciudad de Morelia, Michoacán, la cual presenta en la época de lluvias problemas de inundaciones en algunas de las colonias pertenecientes a este municipio. Es importante mencionar que, únicamente se tomará en cuenta la parte del municipio correspondiente a la zona urbana dentro de la que se presentan los fenómenos que se pretenden mitigar con los sistemas urbanos de drenaje sostenible que se mencionan dentro de este trabajo.

### 3.2 LA CIUDAD DE MORELIA.

A lo largo del siglo XVI se erigieron primero pequeños centros de población los cuales paulatinamente llegaron a ser grandes ciudades las cuales reciben actualmente los nombres de: Morelia, Puebla, Oaxaca, Guadalajara. Sin embargo el proceso de consolidación de dichas ciudades no fue fácil ya que eran los primeros intentos de un proyecto que buscaba tener la mejor ubicación en aquel mundo el cual resultaba hostil y desconocido. En este contexto se fundaron varias ciudades en Michoacán como Zamora y Pátzcuaro en 1540, Valladolid en 1541 entre otras. (Aguirre, 1988).

La ciudad de Morelia fue conocida anteriormente con el nombre de Valle de Guayangareo (Guayangareo, que significa Loma Chata) y que se encontraba rodeada por ríos, bosques, minerales y otros recursos naturales que eran entre otras las especificaciones que decía Platón que debían tener todas las ciudades para poder permitir un crecimiento constante y a su vez un crecimiento del Imperio. Este sitio, a pesar de que para Humboldt no era el más indicado, mantendría a la ciudad lejos de los peligros de inundaciones y otras eventualidades naturales además de que estaba rodeada de recursos naturales, que parecían inagotables en aquella época (Humboldt, 1984).

A quien se atribuye la fundación de la ciudad en la loma de Guayangareo es al Virrey Antonio de Mendoza. Él, describió el sitio seleccionado en los siguientes términos: “concurrén en él todas las buenas cosas que son necesarias para un pueblo, así de tierras baldías, de regadíos, como de pastos y fuentes y ríos y madera y piedra y cal y experiencia de ser muy sano” (Lemoine, 1962).

Según el cronista agustino Diego de Basalenque (1963) en el sitio donde se fundó Valladolid existían seis de las siete condiciones que según Platón debería tener toda gran ciudad:

**Primera.** Tener un “lindo puesto, y fuerte para los edificios, y que nunca le inundén las muchas aguas”. En efecto, la Loma de Guayangareo cuenta con estas características: se encuentra en la “loma chata” muy por arriba de los cauces

de los ríos Chiquito y Grande de Morelia y por ello la ciudad en el periodo de 1541 a 1921 fue inmune a las inundaciones. Basalenque (1963) describía cómo la ciudad estaba bien ubicada en ese sentido, diciendo: "...y aunque los dos ríos que la ciñen, salgan de madre, no pueden hacer daño a las casas, porque es tan seco, que habiendo tantas casas bajas, no se siente humedad en las habitaciones". También el geógrafo y botánico vallisoletano Martínez de Lejarza destacaba la buena situación de la ciudad en una descripción de 1822, expresando: "con el terreno sobre que está cimentada, tiene algunas toesas de elevación sobre el nivel de los dos ríos, y con vastos derrames por todas partes, Valladolid está libre de cualquier inundación".

Esta primera condición se cumplió en la ciudad hasta la década de 1960 cuando la traza urbana comenzó a extenderse fuera de los límites del Valle de Guayangareo llenado de colonias y fraccionamientos las tierras bajas del Valle de Morelia dentro del cual existen zonas naturales de inundación tales como Ciénegas y humedales. Aunado a lo anterior, la deforestación acelerada ha afectado las partes altas de la cuenca llevando con ello a desbordamientos periódicos de los Ríos, lo cual afecta a grandes zonas urbanas en las cuales se ubican principalmente personas de escasos recursos o en algunos casos de clase media. Debido a la poca cubierta vegetal en las partes altas de la cuenca, y como parte del proceso natural de erosión, a menudo las inundaciones vienen acompañadas de arrastre de lodos, troncos, rocas y otros tipos de material de desecho como basura que son arrastrados por las grandes corrientes.

Por desgracia dicha cualidad vallisoletana fue olvidada por nuestros modernos fraccionadores, urbanistas y autoridades del ramo, quienes han permitido que la ciudad crezca en zonas fuera de la loma que son inundables y poco aptas para el desarrollo urbano; es decir: "dejar hacer y dejar pasar".

**Segunda.** De acuerdo con Basalenque (1963) la segunda condición era: "que estuviese descombrada de montes y sierras para que el sol la bañe luego que nazca y los aires la purifiquen". Y confirma el cronista: "como le sucede a este puesto que por estar descombrado más de una legua en contorno, el sol la baña luego que

nace, y los aires la purifican de las inmundicias de la tierra”. Al respecto de esta segunda calidad, el también cronista agustino Matías de Escobar (1970) escribió “...Vióse esto en Valladolid, pues lo mismo es rayar el sol, que comunicarle luego sus influjos sin el menor estorbo a la Ciudad y los aires de tal modo la purifican, que a veces con su continuación molestan a los habitantes”. En efecto, los rayos solares son generosos con la Loma Chata, diaria y estacionalmente, gracias a su topografía convexa. Por su parte, los vientos dominantes del suroeste limpiaban la atmósfera de Morelia hasta los años setenta del siglo pasado, en que precisamente en el suroeste de la ciudad y contra todo sentido común y platónico, en la ex-laguna de la Mintzita, se estableció el “dolor de cabeza” del ambiente moreliano: la empresa papelera CEPAMISA. Ahora puede usted disfrutar de las inmundicias que arrojan sus chimeneas las 24 horas de los trescientos sesenta y cinco días del año, gracias a la acción de los vientos dominantes (que provienen del suroeste), mismos que traen la contaminación atmosférica directamente a la ciudad. Esta segunda condición también ha sido desconocida por muchos modernos planeadores urbanos locales y las autoridades municipales, que lo mismo han permitido construir en zonas carentes de esa calidad, y que se ha permitido la instalación de industrias las cuales arrojan sus contaminantes a la atmósfera y éstos son atraídos a la ciudad por acción de los vientos dominantes que provienen del suroeste.

**Tercera.** Abundancia de ríos. En el caso de la ciudad de Valladolid, ésta cuenta con dos ríos cuenta Baselenque “y de tanto provecho, que pueden entrar el uno por la ciudad, y que pueden en sus haldas y bajíos tener lindas huertas”. De acuerdo con escobar (1970) la naturaleza regional de Valladolid era pródiga en el río de Valladolid de la provincia de Michoacán siendo de gran abundancia el bagre, la carpa y otras diversas especies. Desgraciadamente en épocas recientes los desarrolladores y las autoridades de Morelia hemos olvidado las funciones ecológicas y estéticas que han jugado los ríos en las ciudades antiguas y medievales, convirtiéndolas en cloacas y basureros tanto al río Grande como al Chiquito.

**Cuarta.** Abundancia de bosques. Respecto a esto dentro de las crónicas se menciona que Valladolid “tiene asimismo la cuarta calidad, mucha leña, pues a dos leguas tiene bosques inagotables para ciudades muy grandes”. Hoy en día podemos ver con mucha tristeza que la fuente de leña inagotable del “Jardín de la Nueva España” poco a poco se ha convertido en un bosque en vías de extinción.

**Quinta.** La quinta calidad que se pedía y que sigue siendo válida para las ciudades en la actualidad era la existencia de amplias zonas de cultivo rodeando la ciudad. Al respecto nuestro cronista menciona “tiene asimismo abundancia de pan, quinta calidad, pues tiene a ocho leguas en contorno muchos valles para maíz y para trigos de riego”. Estas parcelas o terrenos de cultivo poco a poco han sido desplazados por los fraccionamientos principalmente de clase media y de interés social o popular con una nula o escasa calidad de vida.

**Sexta.** Disponibilidad de proteína animal la cual también existía en la temprana fundación de Valladolid. Respecto a esta calidad Basalenque dice “tiene abundancia de pescado y carne, sexta calidad, pues toda la provincia está llena de estancias de todos los ganados mayores y menores, y de aquí se provee gran parte de la Nueva España”.

Hoy día la región carece no sólo de su histórica situación de superávit de proteína de origen animal, sino incluso de una elemental autosuficiencia alimentaria. Lo anterior debido a que perdió la mayoría de sus recursos pesqueros, al haber perdido el 70% de sus lagos, lagunas y ciénagas (Vargas, 1991) y al haberse contaminado los ríos en cuyas aguas cristalinas antes se producían abundantes bagres, charales y pejerreyes. Sobre la ganadería se puede decir que ha corrido una suerte parecida a la agricultura ya que los ricos pastizales de las ex-ciénagas se han sustituido por zonas urbanas. Una excepción sería el ganado vacuno de leche que ha dado fama a la cuenca lechera del noreste de Morelia.

Terminaba su observación el cronista diciendo que a Valladolid sólo le falta la séptima condición “...porque ni es puerto de mar ni tiene minas, ni tiene beneficios en que los naturales se entretengan”. De alguna forma esta observación sigue teniendo vigencia en la actualidad, al ser conocida por todos, la pequeña planta

industrial de la moderna Morelia y la falta de empleos que padece la ciudad contemporánea ante una nueva crisis.

En 1828 dejaría de llamarse Valladolid para adoptar el nombre de Morelia en honor a Don José María Morelos y Pavón, héroe de la Independencia de México y uno de sus hijos más distinguidos.

A decir de Zamudio: “Estos tres nombres representan las etapas más significativas de la vida nacional, Guayangareo la indígena, Valladolid la española y Morelia en la vida de la nación independiente”.

Según la autora, fue el propio Virrey Don Antonio de Mendoza quién encargó al alarife sevillano Juan Ponce, la proyección de un trabajo urbanístico tomando en cuenta los tratados de Alberti.

El trabajo urbanístico se realizó de 1591 a 1545: dividió la ciudad que imaginaba por una gran avenida a la que llamó Calle Real, después destinó el sitio que debería ocupar la catedral, las casa reales, los portales, la cárcel, la carnicería, el caño de agua y las casas de los vecinos.

Durante la etapa evangelizadora de España fueron los franciscanos Fray Juan de San Miguel y Fray Antonio de Lisboa quienes formaron una escuela de catecismo, llamada San Miguel, en donde también fue transmitida la enseñanza de la música y las artes en general, entre otros tantos oficios. Por disposición del entonces Virrey Antonio de Mendoza se traslada a Morelia la cabecera de la diócesis de Michoacán y su impacto fue significativo pues aceleró su proceso de crecimiento económico y poblacional al acoger a muchos españoles avecindados en tierras michoacanas, lo que con el pasar del tiempo le otorga un valor amplio y variado como centro cultural y religioso.

La construcción de la imponente catedral de Morelia comenzó el 6 de agosto de 1660, estuvo a cargo del arquitecto italiano Vincenzo Baroccio de la Escayola también conocido como “el romano”, sin embargo, a causa de su muerte en 1695 fue sustituido por los arquitectos Antonio de Echevira, Juan de Silva y Lucas Durán;

---

con el pasar del tiempo José de Medina en 1744 sería testigo de la culminación de la obra.

A principios del siglo XIX, fue descubierta la denominada “Conspiración de Valladolid”, una reunión secreta de personajes de clase criolla con formación académica e ideales libertarios que en 1809 planeaba evitar que el emperador francés que había invadido España, se apoderara también del territorio de la Nueva España. El movimiento fue diluido por el gobierno virreinal y algunos conspiradores fueron arrestados mientras que otros fueron condenados al exilio. Sin embargo, sería sólo el inicio del movimiento independentista que fuera encabezado en 1810 por Miguel Hidalgo, quien a su entrada a la ciudad el 17 de octubre encontraría nula resistencia a su campaña.

Tras el triunfo del movimiento independentista, fueron retirados los escudos nobiliarios de las fachadas de las casas y en 1828 el nuevo régimen de gobierno otorga el nombre de Morelia a la ciudad en que nació José María Morelos el día 30 de septiembre de 1765.

Es, pues, la ciudad de Morelia una de las más importantes tanto económicamente, como históricamente para el País. Pero también es bien conocido que la ciudad ha crecido a un ritmo acelerado en los últimos años, se han desarrollado nuevos fraccionamientos en el llamado periurbano de la ciudad, en muchas ocasiones sin una planeación definida, afectando sitios tanto de recarga de aguas subterráneas, como sitios naturales de depósito de escurrimientos pluviales.

## 4. JUSTIFICACIÓN

Uno de los problemas que más afectan no solo a las ciudades, sino al mundo entero es el cambio climático, en la Figura 11 se observa que una lluvia de poca duración causa leves inundaciones en la ciudad de Morelia.. Esta alteración en los ciclos naturales del entorno contribuyen enormemente a la formación de fenómenos naturales cada vez más devastadores, dando como resultado lluvias atípicas, huracanes cada vez más fuertes, agresivos y devastadores.



*Figura 11 Lluvia atípica en la ciudad de Morelia (Avenida Acueducto esquina con Lázaro Cárdenas). Tomada en Junio de 2017*

La implementación de nuevas técnicas de construcción, así como una mayor conciencia ecológica de los seres humanos es cada vez más necesaria para poder contribuir a la remediación de estos cambios que afectan de manera directa en nuestra vida diaria. El mirar atrás para darse cuenta de cómo el hombre convivía con su entorno es importante para saber que se han estado utilizando mal los recursos, pero que se pueden llegar a resolver estas problemáticas si existe un

compromiso para vivir un poco más en armonía con la naturaleza (Marchena Ávila, 2012).

Por estos motivos es que la implementación de nuevos sistemas de drenaje, más amigables con el medio ambiente, así como una gestión más inteligente y adecuada del agua de lluvia puede contribuir a reducir los gastos de energía que tiene un municipio o una vivienda en cuestión de tratamiento de aguas o incluso de climatización de nuestras viviendas. El uso de sistemas de gestión, manejo y captación de agua de lluvia contribuye también a un desarrollo más agradable a la vista, dando a las ciudades una mejor apariencia y previniendo de manera natural las catástrofes como inundaciones y deslaves, con lo que existe una mejora tangible en el entorno visual, confort en nuestras casas y a su vez un incremento en el valor comercial, todo esto sin mencionar las reducciones de emisiones de gases contaminantes, favorecer la síntesis de los mismos de manera natural y la generación de hábitat para especies propias de las regiones e incluso creando nuevos hábitats para otras especies.

Entre las ventajas que tiene la implementación de SuDS en lugar de los sistemas convencionales de drenaje se encuentra la capacidad de disminuir la concentración de contaminantes, favorecer el fenómeno de la infiltración del agua que conlleva a la conservación de los mantos acuíferos, el incremento del valor estético de las áreas intervenidas y la generación de hábitat para algunas especies, entre otras. (Woods-Ballard, Kellagher, *et al.*, 2007a).

Se considera importante establecer de manera clara las alternativas de manejo de aguas por medio de los sistemas de drenaje sostenible, que coadyuven a mitigar el impacto que el agua de lluvia tiene en las poblaciones, reduciendo con ello el consumo energético, además de mejorar el entorno físico y reducir el consumo energético, así como tener más vegetación dentro de las ciudades, mejorar la calidad en el agua y evitar paulatinamente el impacto catastrófico que las escorrentías causan en las ciudades.

---

## 4.1 MARCO LEGAL.

De acuerdo con la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (2015) se puede observar que en el Artículo 4 párrafo cuarto menciona que “toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo”. De igual manera en el Artículo 27 párrafo tercero dice lo siguiente: “La Nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicta el interés público, así como regular, en beneficio social el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. En consecuencia se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; para el fraccionamiento de los latifundios; para disponer, en los de la ley reglamentaria, la organización y explotación colectiva de los ejidos y comunidades; para el desarrollo de la pequeña propiedad rural; para el fomento de la agricultura, de la ganadería, de la silvicultura y de las demás actividades económicas en el medio rural, y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad”.

De esta manera, es muy importante lo expresado dentro de la constitución política de los estados unidos mexicanos en donde, entre otras cosas, se menciona la protección al medio ambiente, así como la implementación de medidas de restauración y mitigación de los daños ambientales ocasionados por las actividades humanas, ya sean de recreación como en parques y centros eco turísticos, o en cada una de las actividades económicas que se realizan a diario.

Por tal motivo la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible coadyuvan al mejoramiento de la calidad de vida de las personas y de manera análoga pueden contribuir a la mitigación y una posible prevención del deterioro del

medio ambiente teniendo una mejor calidad en el agua, la disminución en el consumo de energía para el procesamiento de las aguas residuales, la utilización de aires acondicionados, disminuir la cantidad de escurrimiento pluvial y la recarga de los mantos acuíferos mediante la reinyección natural del agua en sistemas de drenaje diseñados adecuadamente para ello.

## **5. HIPÓTESIS**

1. La implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) dentro de la ciudad de Morelia contribuye a administrar el agua de lluvia y con ello disminuir el volumen de escurrimientos pluviales, que son los principales causantes de las inundaciones.

## **6. OBJETIVOS**

1. Hacer un análisis de la literatura existente para determinar la factibilidad de la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) en la Ciudad de Morelia, Michoacán.
2. Llevar a cabo un análisis de la topografía de la ciudad de Morelia, Michoacán para determinar los sitios potenciales para la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS).
3. Realizar un inventario de los beneficios y de los puntos en contra en la utilización de sistemas urbanos de drenaje sostenible.

## 7. METODOLOGÍA

### 7.1 Resumen del gasto energético de la ciudad de Morelia.

La ciudad de Morelia (Figura 12) se encuentra en las coordenadas  $19^{\circ} 42' 26''$  de latitud Norte y  $101^{\circ} 10' 53''$  de longitud Oeste con una altitud de 1 920 m. en promedio en la ciudad (INEGI, 2016 a).

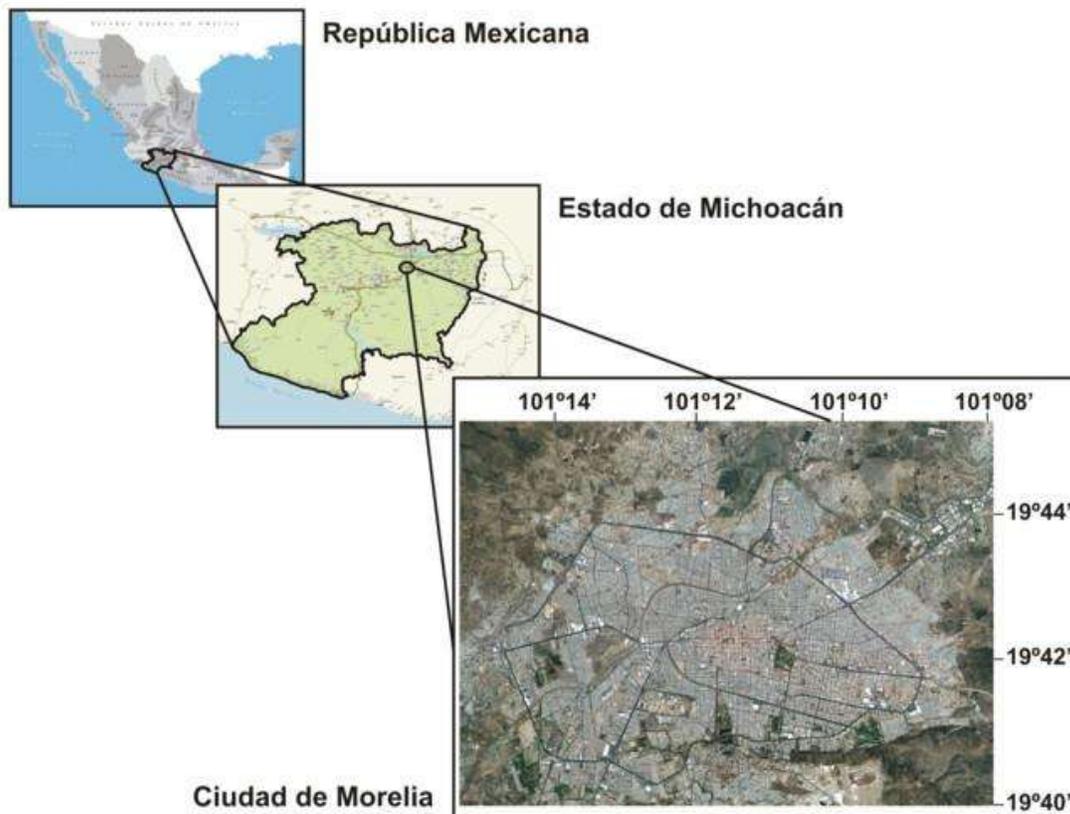


Figura 12 Localización de la Ciudad de Morelia.

La distribución de los consumos de energía eléctrica dentro de la ciudad de Morelia esta descrita por la Secretaría de energía. De hecho todas las actividades del sector de energía eléctrica se encuentran bajo las facultades de la empresa de servicios del estado, la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Morelia consume alrededor del 13% del consumo total de energía eléctrica del estado de Michoacán. De este

total, la industria emplea el 50% de la electricidad por un 31% que consumen los hogares y el sector comercial y de servicios apenas consume un 15% del total (SENER, 2016).

**EDIFICIOS MUNICIPALES-** Los 66 edificios municipales de Morelia están organizados de la siguiente manera: 48 edificios corresponden a oficinas municipales, dos a edificios culturales (teatros, museos, auditorios, bibliotecas), tres a edificios recreacionales (teatros, museos, estadios, centros de asistencia social) y 13 se destinan a otros usos. En promedio, cada oficina municipal ocupa 4 778 m<sup>2</sup> de superficie, los edificios culturales 685 m<sup>2</sup> y los edificios destinados a la recreación 3 710 m<sup>2</sup>. Asimismo, una oficina municipal está ocupada por 1 050 personas, un edificio cultural por sólo 100 personas y un edificio recreacional por 550 ocupantes (SENER, 2016).

En los últimos cinco años sólo una pequeña parte de las oficinas municipales (15%) ha tenido algún tipo de reacondicionamiento en lo que refiere a iluminación interior y apariencia exterior. Sin embargo, no ha existido alguna modificación a los otros tipos de edificios municipales. Por otro lado, en las oficinas municipales, se estima que en promedio hay iluminación por 12 horas y los servicios por artefactos (como refrigeradores y computadores, etc.) se hacen por 8 horas. Para el caso de los edificios culturales, y edificios recreacionales la iluminación se provee de igual manera por 12 horas en promedio (SENER, 2016).

En cuanto a la construcción de los edificios, las oficinas municipales se construyeron principalmente con ladrillos (79%) y piedra (21%); los edificios culturales de ladrillos (50%) y piedra (50%), finalmente los edificios recreacionales se construyeron en un

100% con ladrillo. El número promedio de lámparas al interior de cada construcción para oficinas municipales es de 1 227, dentro de las cuales podemos observar lámparas de tecnología de tubos T5 (35%) tubos T8 (33%), halógenos (29%) y LEDs (3%). En un edificio cultural existen en promedio 224 lámparas de las cuáles 90% son tubos T8, 9% tubos T5 y 1% halógenos (SENER, 2016).

En un edificio de recreación se estiman 509 lámparas, de las cuales 36% son tubos T5, 32% son tubos T8, 29% es tecnología de halógenos y sólo un 3% es LEDs, el resto corresponde a otro tipo de artefacto. Cabe señalar que sólo algunas oficinas municipales cuentan con sistema de aire acondicionado (SENER, 2016).

Es en este campo en donde se puede hacer un mejoramiento por parte de los sistemas urbanos de drenaje sostenible, ya que al utilizar sistemas como techos verdes, sistemas de captación de agua potable, entre otros, se contribuye a ahorrar energía en bombeo de agua, o en calefacción o aire acondicionado para los edificios ya que estos sistemas contribuyen en gran medida a mejorar el confort dentro de las viviendas.

El consumo de electricidad por metro cuadrado en los edificios del municipio ubicada a Morelia entre las ciudades con menor consumo energético de la base de datos de TRACE, probablemente derivado del clima templado en la región, que conlleva la ausencia de acondicionamiento y calefacción en los edificios. El consumo de electricidad por parte de las oficinas municipales es de 439 680 kWh al año, mientras que para los edificios culturales es de 6 336 kWh al año y corresponde a un consumo de 145 920 kWh al año en los edificios recreacionales.

Estas cifras señalan que hay un mayor gasto para cubrir el consumo de energía por parte de las oficinas municipales (1.4 mdp al año). De acuerdo con el análisis de datos, se emiten algunas recomendaciones al municipio de Morelia (SENER, 2016):

- Determinar cuáles son las oficinas con mayor potencial de ahorro de energía, a fin de gastar menos recursos por el consumo de electricidad y a su vez sean edificios con tendencia sustentables.
- Auditar a todos los edificios municipales para determinar el desempeño energético de cada uno.

## **7.2 Análisis de la información geográfica de la ciudad de Morelia.**

Una parte importante del análisis para la implementación de los SuDS es llevar a cabo una revisión de la información geográfica del Municipio de Morelia. De acuerdo con el marco geo estadístico del INEGI (2010) en el total del municipio de Morelia, Michoacán existe una población total de 729 279 habitantes de los cuales 348 994 personas son hombres y 380 285 son mujeres de diferentes edades cuyos porcentajes se presentan en la Figura 13.



Figura 13 Distribución de la Población total del municipio de Morelia por sexos. Elaboración propia con base en Marco geo estadístico del INEGI 2010

Dentro del municipio de Morelia, existen un total de 256 745 viviendas, de las cuales 190 537 viviendas se encuentran habitadas. Así mismo de este total de viviendas 250 809 son particulares.

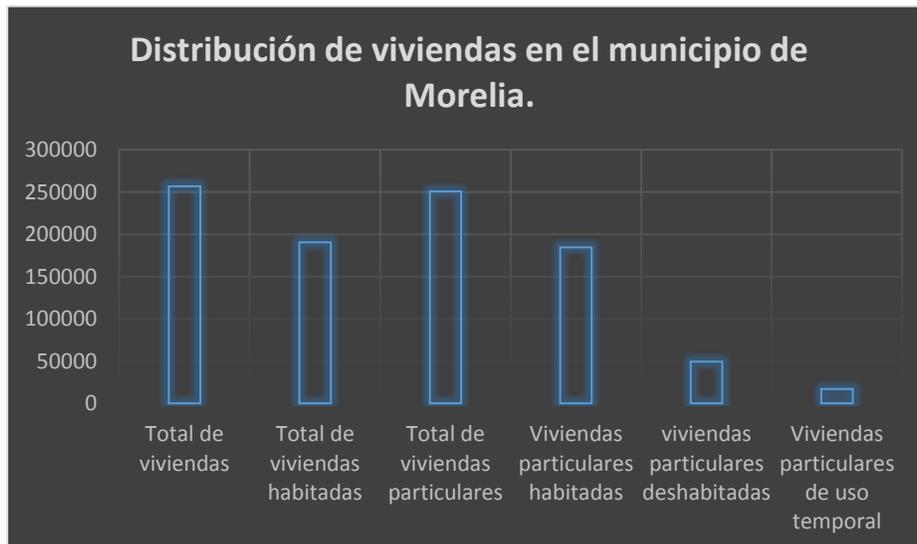


Figura 14 Viviendas en la ciudad de Morelia. Elaboración propia con base en Marco geo estadístico del INEGI 2010

La población y extensión del municipio de Morelia es muy grande (Figura 14) y el presente estudio solo se enfocará en la zona urbana y conurbada del municipio de Morelia por lo que se llevará a cabo la comparación respecto al total del municipio únicamente con la zona urbana y las poblaciones cercanas.



Figura 15 Municipio de Morelia, Mich. Elaboración propia con el Mapa Digital de México

Con base en lo anterior, de acuerdo con la información del INEGI obtenida del proyecto básico de información CENSO 2010, en la ciudad de Morelia existe una distribución de la población de la siguiente manera: la población total del municipio es de 597 511 habitantes, de los cuales 284 708 son hombres y 312 803 son mujeres de distintas edades (Figura 15).



*Figura 16 Distribución de la Población total de la ciudad de Morelia por sexos. Elaboración propia con base en Marco geo estadístico del INEGI 2010*

En la ciudad de Morelia, Michoacán existen 200 042 viviendas en total, de las cuales solamente 155 532 se encuentran habitadas, es decir que alrededor de un 22.25% de las viviendas de la ciudad se encuentran deshabitadas. 195 703 viviendas son particulares, de las cuales 31 568 están deshabitadas. De esta manera se puede ver que existe una gran cantidad de viviendas, las cuales tienen un gran potencial para ser utilizadas dentro del esquema de los sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Es importante señalar que la información anterior corresponde únicamente a la ciudad de Morelia, pero dentro de la zona urbana y conurbada de la ciudad existen asentamientos diversos como son Galaxia Tarimbaro, Villas de la Loma, Villa Magna, San Antonio, Tenencia Morelos, Jesus del Monte, La Aldea, Puerto de Buena Vista, Villas del Pedregal, entre otros, como puede ser observado en la Figura 17.



*Figura 17 Zona urbana y conurbada de la ciudad de Morelia. Elaboración propia con información del mapa digital de México (INEGI).*

### **7.3 Antecedentes de inundaciones en Morelia.**

Desde el año 1991 al 2005 se estima que alrededor del 25.0% de los desastres naturales ocurridos en el mundo han sido atribuidos a las inundaciones. De ahí la importancia estudiar este tipo de eventos catastróficos debido a su alta recurrencia. De hecho en Norteamérica es el segundo tipo de peligro más recurrente. Debido a la naturaleza misma de las inundaciones se puede afirmar que se presentan como uno de los tipos de desastre que afecta con mayor frecuencia a nuestras ciudades. Es importante señalar que las inundaciones causan daños elevados en la infraestructura urbana.

Es importante señalar que en las zonas urbanas se incrementa la ocurrencia de eventos de inundación debido a diversas causas:

- La ocupación de las llanuras de inundación de los ríos.
- La acumulación de desechos sólidos.
- La construcción de muros junto a cauces de ríos. (Figura 18)
- Mal diseño de puentes y alcantarillas siendo estos insuficientes para las avenidas máximas.
- Deforestación.
- La urbanización mal planeada.



*Figura 18 Muro en el cauce del Río Grande de Morelia, fuente: La Voz de Michoacán*

Debido a este tipo de incidentes se ha incrementado la vulnerabilidad de la población a los fenómenos naturales antes descritos.

En el caso de estudio, la ciudad de Morelia, el crecimiento y la expansión urbana ha hecho que hayan sido utilizadas áreas con condiciones caracterizadas como de alto grado de peligrosidad hidrológica e hidráulica y que dichas áreas fueran objeto de una indiscriminada urbanización, de manera particular zonas muy extensas sujetas

a inundaciones (Arreygue-Rocha *et al*, 2004). Uno de los detonantes históricos del crecimiento urbano de la ciudad de Morelia, es la localización geográfica de los ríos Grande y Chiquito, con sus respectivas rectificaciones, así como la construcción de la presa de Cointzio y la implementación del sistema de riego San Bartolo – Queréndaro. Dichas obras de infraestructura hidráulica impulsaron, y siguen impulsando, el desarrollo agrícola en la región, a la vez que se aumentó la capacidad de dotar de agua potable a la población y poder llegar a una mayor cantidad de habitantes. Todas estas características han propiciado que exista un crecimiento urbano, mismo que ha sido caótico, desmesurado y mal planeado desde principios de los años setenta (Arreygue-Rocha *et al*, 2004).

De acuerdo con los resultados de Arreygue-Rocha (2004) acerca del flujo meteórico y flujo superficial del río Chiquito, se aprecia que de acuerdo con la información histórica de las cuatro estaciones meteorológicas de la ciudad de Morelia, obtuvo una precipitación media anual de 974.22 mm, una temperatura media anual de 17.3°C y evapotranspiración de 638.1 mm. Finalmente obtuvo un caudal anual de 11 739.72 m<sup>3</sup>. Este es un referente de la aportación que tiene el río Chiquito al río Grande.

De igual manera dentro de la configuración de la red hidráulica los puentes vehiculares juegan un papel muy importante ya que constituyen un obstáculo para el escurrimiento natural de las aguas superficiales. Debido a esto ha habido en la ciudad un incremento sustancial de la peligrosidad y vulnerabilidad a eventos de inundación (Figura 19).

Otro de los factores que influyen en la peligrosidad es la morfología del río. Debido al depósito de sedimentos, a la presencia y posibilidad de desarrollar cobertura vegetal, así como la pendiente aguas arriba, hacen que la sección urbana se vea disminuida la capacidad de conducción del cauce y, de manera inversa, un incremento en la peligrosidad de inundaciones en las zonas adyacentes al flujo del agua.



Figura 19 Áreas inundables de la ciudad de Morelia. Fuente: Arreygue-Rocha, (2004)

De acuerdo con la información de la Figura 19, generalmente las zonas que tienen una mayor vulnerabilidad ante los eventos de inundación son los asentamientos humanos que están ubicados en las márgenes de los ríos. Esto tiene sentido ya que los cauces dentro de su morfología tienen una llanura de inundación, la cual ha sido invadida siendo esta la principal causa de estos desastres.

La ciudad de Morelia desde su fundación ha pasado por diferentes etapas de urbanización, caracterizadas por la consolidación de la ciudad, el movimiento de

independencia, conflictos internos de poder, la revolución mexicana, crisis políticas y recuperaciones económicas y demográficas. Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo XX, la ciudad comenzó a experimentar un crecimiento urbano significativo e irreversible, el cual ha incidido en la reconfiguración territorial y en la ocupación periférica actual.

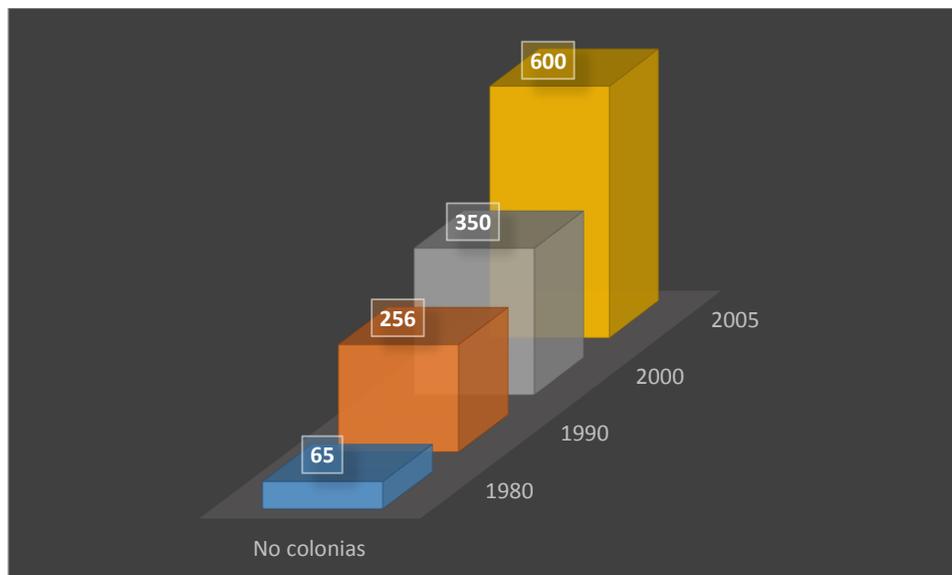
Durante la décadas de los treinta y los cuarenta la ciudad presentaba un crecimiento poblacional relativamente bajo (40 000 y 44 304 habitantes, respectivamente) y un proceso urbano sin grandes fluctuaciones.

Así también, en los cuarenta se formaron las primeras colonias y se presentó una ligera expansión hacia los márgenes de los principales ríos, propiciando las bases en el incremento considerable de suelo urbano y poblacional, situación que se extendería durante las dos décadas siguientes.

Para el año de 1 970 la población se incrementó a 161 040 habitantes este crecimiento demográfico exponencial influyó en gran medida en el aumento de asentamientos humanos sobre los límites de la ciudad (cubriendo una superficie de 3 500 ha), ocupando suelos sin una vocación urbana y presentando problemas de inundaciones debido a los recurrentes desbordamientos del río Grande.

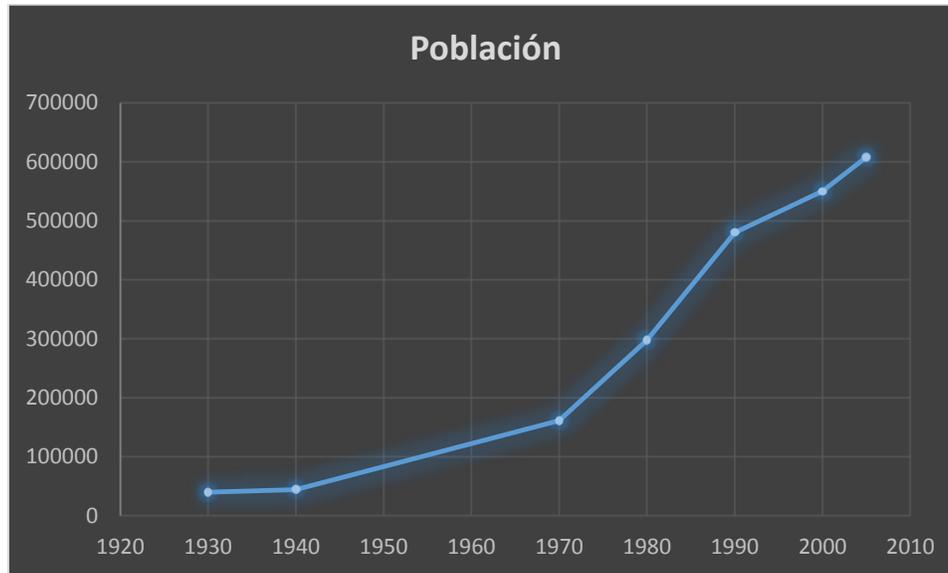
A partir del año de 1980, el proceso urbano se hizo más evidente, principalmente con los constantes desplazamientos hacia la periferia de la ciudad, ocupando suelos de difícil acceso para la dotación de servicios, marcados bajo su irregularidad y situados en zonas naturales de anegación. El número de colonias se incrementó a 65 en una superficie de 4 000 hectáreas y con una población de 297 544 habitantes

(Consejo Nacional de Población, 2006). Para 1990 la ciudad estaba conformada por 256 colonias en una superficie de 5 427.3 hectáreas con un total de 480 269 habitantes (Tapia y Vargas, 2006), mientras que al año 2000 la ciudad presentaba un total de 549 996 habitantes, mientras que el número de colonias se incrementó a 350. Ya para el año 2005 la ciudad estaba conformada por más de 600 colonias con una población de 608 049 habitantes en una superficie de 9 804.4 hectáreas. Dentro de la Figura 20 se puede ver el incremento en el número de colonias que existe dentro de la ciudad de Morelia. Es importante apreciar que en 5 años, 2000 a 2005, el número de colonias existentes en la ciudad casi se duplicó.



*Figura 20 Incremento en el número de colonias.*

También es importante conocer que el incremento de la población ha sido muy importante en los últimos años. Con base en la información de la Figura 21 se puede observar el crecimiento que ha habido en el número de habitantes de la ciudad de Morelia hasta 2005.



*Figura 21 Incremento en el número de habitantes en la ciudad de Morelia.*

Estos factores ponen de manifiesto que el proceso de urbanización de los últimos treinta años representa una nueva dinámica en el crecimiento de la ciudad, destacando el muy corto tiempo en el que este se ha presentado. La fuerte dinámica demográfica y la presión que esta ha generado en la ocupación de nuevos espacios en la periferia de la ciudad, principalmente a partir de la década de los ochenta, reflejan las debilidades de los planes de desarrollo urbano que no han sido capaces de frenar la expansión de los límites de la ciudad, situación que, acorde a las estimaciones demográficas, continuará durante los próximos 20 años.

De la misma forma, los intentos por disminuir el excesivo crecimiento de superficie urbana han fracasado; por otra parte se destaca el notorio cambio en el uso del suelo de agrícola a urbano durante los últimos 35 años, destacando sitios donde su giro cambió radicalmente al uso habitacional y habitacional mixto (65%), en los cuales comúnmente se edifican viviendas autoconstruidas sujetas a condiciones precarias que poco a poco se van consolidando. (Hernández y Vieyra, 2010).

---

## **7.4 Sitios de oportunidad dentro del municipio de Morelia.**

Hablar de la ciudad de Morelia es hablar de una ciudad de tipo medio, de acuerdo con la ONU, y por la extensión y sectorización que representa sería un proyecto demasiado ambicioso, y en cierta medida utópico, el tratar de abordar toda la extensión de la ciudad para proponer los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS). Por dicho motivo, el poder determinar cuáles son los sitios más propensos a inundaciones, que es uno de los objetivos principales de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, es el paso más importante para determinar el sitio adecuado para el estudio. Una vez realizado el estudio y la propuesta de los SuDS el poder replicarlos dentro de otras zonas con condiciones similares sería mucho más sencillo.

Como se pudo observar en la Figura 19 las zonas más propensas a sufrir inundaciones son las que se encuentran en los márgenes de los Ríos. Más en específico las colonias electricistas, Félix Ireta, Ventura Puente, Chapultepec Sur, Camelinas, Molino de Parras, Tres Puentes, entre muchas otras. Las colonias anteriores cumplen con la descripción de que se encuentran en las márgenes del Río Chiquito de Morelia. Sin embargo, existen algunas colonias más, ubicadas en el periurbano de la ciudad, que también sufren este problema pero es debido a su mala planeación, a la precariedad de las viviendas e incluso a los malos hábitos de sus habitantes.

Ahora bien, una de las zonas en las que debido a sus condiciones topográficas, a los tipos de viviendas y la extensión de las mismas, aunado a la amplitud en la geometría de sus calles y áreas verdes es el Boulevard García de León hacia la

parte alta de la Loma de Santa María. En esta zona es posible la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible ya que cuentan con infraestructura aprovechable. Un punto en contra para este sitio es que no cuenta con una delimitación exacta y se tiene que hacer un análisis integral para después focalizarlo en la zona de interés, así mismo la geometría de las viviendas es muy diversa, lo que representaría un análisis más largo, sin embargo esto no representa un riesgo de error. Otra zona con potencial para el análisis de la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible es el Fraccionamiento Villas del Pedregal ubicado en el Periurbano de la ciudad de Morelia. Este Fraccionamiento cuenta con la infraestructura suficiente para poder adaptar los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y un punto a favor es que cuenta con viviendas tipo, esta sectorizado y esto representa una simplicidad para el análisis de la implementación de ciertos puntos del tren de distribución de los SuDS. Aunado a lo anterior, el fraccionamiento cuenta, en cierta medida con una planeación programada de crecimiento, por lo que están divididas las etapas de crecimiento y simplificaría un poco el análisis.

Algunas de las características que definen la zona de la Avenida solidaridad es que precisamente se encuentra en la margen del Río Chiquito. El primer obstáculo que tiene el cauce del Río chiquito es precisamente el puente que se encuentra en Av. Camelinas (Figura 22), el cual actúa ante una avenida extraordinaria como un dique, provocando que el agua remanse y se desborde. Aguas abajo existen estos mismos problemas debido a la presencia de más puentes vehiculares que cruzan el cauce del río.



*Figura 22 Cruce de Av. Solidaridad con Av. Camelinas*

A pesar de que los hombros del río se encuentran más arriba del nivel de las calles se han presentado diversos desbordamientos en el río, lo que genera problemas de inundaciones.

Una de las iniciativas del H. Ayuntamiento de Morelia es el saneamiento del Río chiquito eliminando la descarga de aguas residuales en la zona. El Alcalde de Morelia Alfonso Martínez Alcázar (SOCIAL, C.) especificó que con el Colector Sanitario se evitará que al menos 70 litros por segundo de aguas negras de las colonias aledañas no desemboquen en el río, pues gracias a la tubería que se instalará llegará directamente a la planta tratadora de aguas residuales, provocando que el vital líquido corra limpio por este afluente (Figura 23). Es de señalar, que la construcción del colector sanitario madrina Avenida Solidaridad, tramo Av. Camelinas - Morelos Sur, margen izquierdo del Río, comprende una longitud de 2 836 metros, espacio en el que se colocará un colector general con tubería de

polietileno de alta densidad; tendrá un cruce del colector con Avenida Camelinas y otro cruce del colector con la Avenida Ventura Puente; además de señalización y medidas de impacto ambiental (SOCIAL, C. 2016).



*Figura 23 Cauce del Río Chiquito. Vista hacia aguas abajo.*

Estas iniciativas son muy importantes para el desarrollo integral y sustentable de las ciudades debido a que, para que exista un crecimiento en la utilización de mecanismos que ayuden a prevenir y mitigar la contaminación, es necesario que exista iniciativa gubernamental, los programas de apoyos suficientes, estímulos y sobre todo, una legislación con lo que se pueda tener un control y marcar los lineamientos para la implementación de los programas que surgieran o las iniciativas.

---

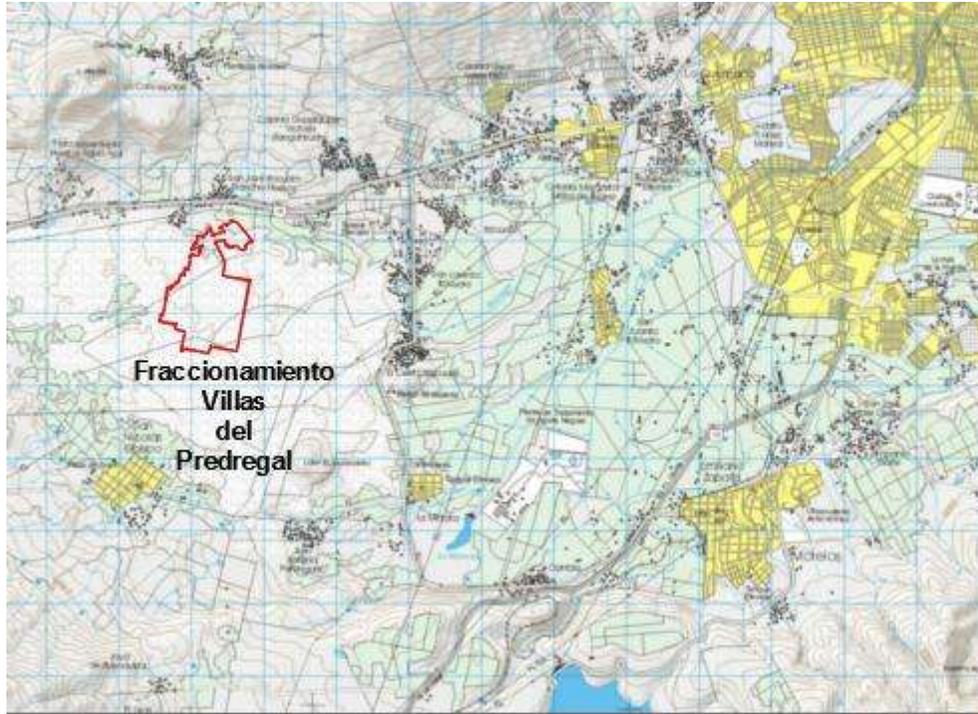
## **7.5 Selección de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) en Villas del Pedregal.**

### **7.5.1 CONDICIONES ANTES DE LA URBANIZACIÓN.**

Para determinar las características que el sitio tuvo antes de la urbanización es necesario utilizar las imágenes satelitales de años anteriores a la construcción del fraccionamiento “Villas del Pedregal”. Otra opción útil para la obtención de las características del sitio antes de la construcción del fraccionamiento es la consulta de las cartas edafológica y topográfica del INEGI, información con la que se obtiene el uso del suelo anterior y el tipo de suelo existente en la zona.

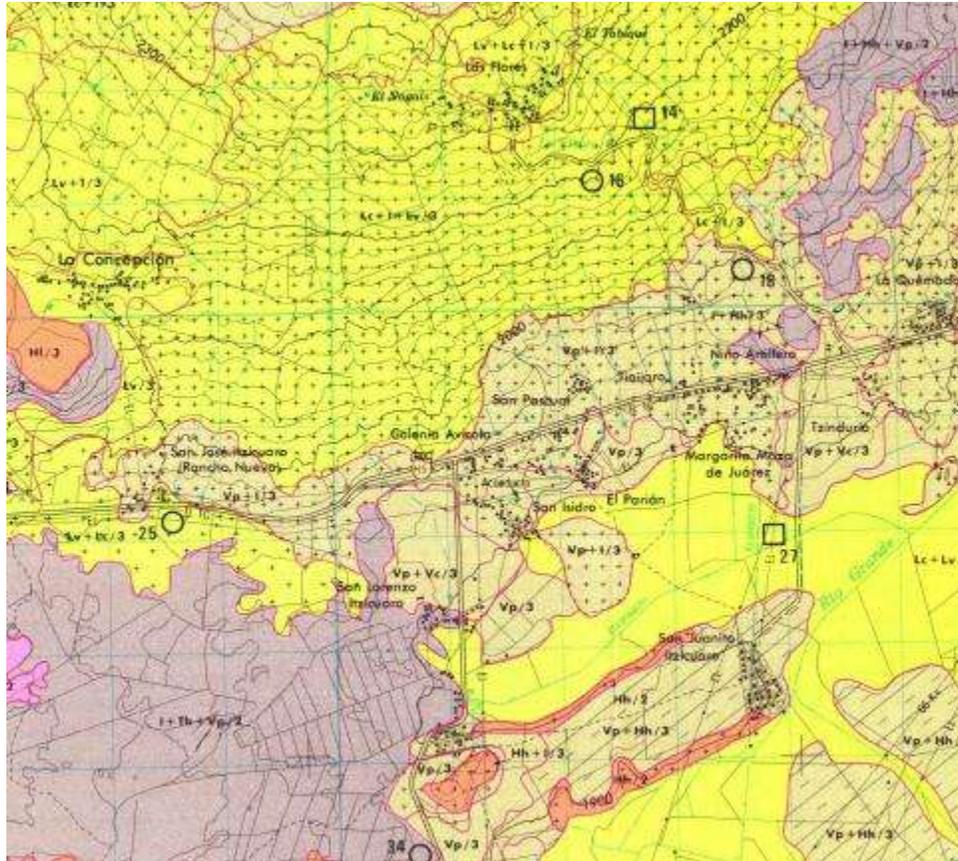
Con los datos de las características del suelo es posible determinar el número de escurrimiento, la pendiente y la existencia de escurrimientos naturales en la zona, depresiones y características morfológicas del terreno que hayan sido modificadas y que puedan ser utilizadas para tratar de igualar las condiciones que tenía el terreno antes de su urbanización.

Derivado de la información de la carta topográfica en escala 1:50 000 del INEGI (Figura 24), es posible determinar que la cobertura del suelo corresponde a un malpaís, lo cual se refiere a cobertura de origen volcánico, poco erosionado, caracterizado por tener en mayor proporción arena y permitir el paso del agua debido a los patrones muy bien establecidos.



*Figura 24 Ubicación del fraccionamiento Villas del Pedregal en la carta topográfica del INEGI*

De la Figura 24, es posible apreciar que no existen escurrimientos superficiales naturales, ya sea perenes o efímeros. También se observa que existe un desnivel en el terreno de alrededor de 20 m lo anterior debido a que solo cruza dos curvas de nivel que, en esta carta topográfica, están espaciadas a cada 20 m.



*Figura 25 Tipo de suelo en la zona del fraccionamiento Villas del Pedregal. Carta Edafológica del INEGI*

De la Figura 25 es importante resaltar que el suelo dominante es un Litosol (I+Th+Vp/2) el cual es la unidad dominante, seguido de un andosol húmico, y un vertisol pélico de textura media. El litosol, es el suelo predominante en el país, literalmente su significado es suelo de piedra, se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. En bosques y selvas su uso es forestal; cuando hay matorrales o pastizales se puede llevar a cabo un pastoreo más o menos limitado y en algunos casos se destinan a la agricultura, en especial el cultivo de maíz o de nopal, condicionado a la presencia de suficiente agua (INEGI, 2008). El Andosol, es un suelo negro de origen volcánico constituido principalmente de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo. Es característico de la zona de mil cumbres y la neovolcánica tarasca, en el estado de Michoacán. Generalmente son de color oscuro y tienen una alta capacidad de retención de humedad. En condiciones naturales presentan

vegetación de bosque o selva. El uso más favorable para su conservación es el forestal ya que son muy susceptibles a la erosión eólica (INEGI, 2008). La subunidad “húmico” se refiere a un suelo con una capa superficial oscura y rica en materia orgánica, pero ácida y pobre en algunos nutrientes para las plantas (INEGI, 2008).

Con las condiciones anteriores del tipo de cobertura y el tipo de suelo existente en la zona donde se ubica en fraccionamiento Villas del Pedregal, es posible determinar las condiciones para encontrar el número de escurrimiento. De acuerdo con Aparicio (2009), para seleccionar el número de escurrimiento se debe saber el uso que tiene el suelo, que para este caso es un pastizal, con una pendiente menor al 1%, en un suelo tipo C que corresponde a un suelo con arenas finas, limos, suelos con altos contenidos de arcilla. De esta manera, el número de escurrimiento correspondiente es  $N=74$ .

El área obtenida de AutoCad con las imágenes satelitales es de 1 346 202.558 m<sup>2</sup>. Con estos datos y los datos de precipitación de la estación pluviométrica número 16 247, ubicada en Capula.

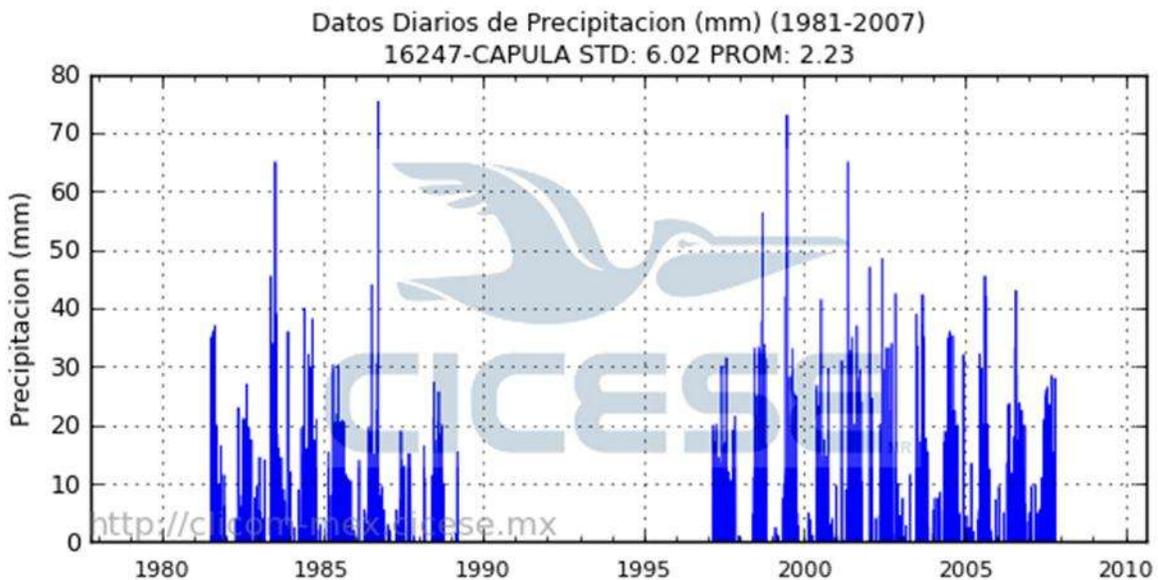


Figura 26 datos de precipitación diaria. CLICOM, 2017

Con la finalidad de obtener un tiempo de concentración adecuado, se utilizó la fórmula del Soil Conservation Service (SCS), de los estados unidos, la cual fue calibrada para cuencas pequeñas y tienen mejores resultados para lugares con superficies altamente impermeables, como es el caso del fraccionamiento Villas del Pedregal. La fórmula es la siguiente:

$$t_c = \frac{0.0136L^{0.8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{S^{0.5}}$$

Donde:

L= Longitud del cauce principal.

S = Pendiente del cauce principal.

CN = Número de curva

Los datos de la micro cuenca que representa el fraccionamiento son:

- ◆ Área de la cuenca 1.35 km<sup>2</sup>.
- ◆ Numero de escurrimiento 74.
- ◆ Tiempo de concentración 145 min.
- ◆ Longitud del cauce principal (calle principal) 2.1 km.
- ◆ Pendiente 1.15%
- ◆ Superficie impermeable 5%.

Con los datos anteriores en el programa HEC-HMS, se puede conocer cómo eran las condiciones de lluvia en la zona antes de la urbanización.

Project: villas 2 Simulation Run: ANTES

Start of Run: 20sep2007, 11:00 Basin Model: villas ant  
End of Run: 20sep2007, 23:00 Meteorologic Model: Met 1  
Compute Time: 11sep2017, 23:33:19 Control Specifications: Control 1

Show Elements: All Elements Volume Units:  MM  1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
villas np	1.35	0.2	20sep2007, 16:45	3.2
salida	1.35	0.2	20sep2007, 16:45	3.2

Figura 27 Resultados del análisis de la precipitación para las condiciones antes de la urbanización (HEC-HMS)

De acuerdo con los datos anteriores de la cuenca, en la Figura 27 Se observa el resultado de donde se obtiene que el volumen de escorrentía de 3200 m<sup>3</sup>, con un periodo de análisis de entre las 11:00 am y las 8:00 pm, teniendo el tiempo pico a las 4:45 pm con 0.2 m<sup>3</sup>/s de caudal.

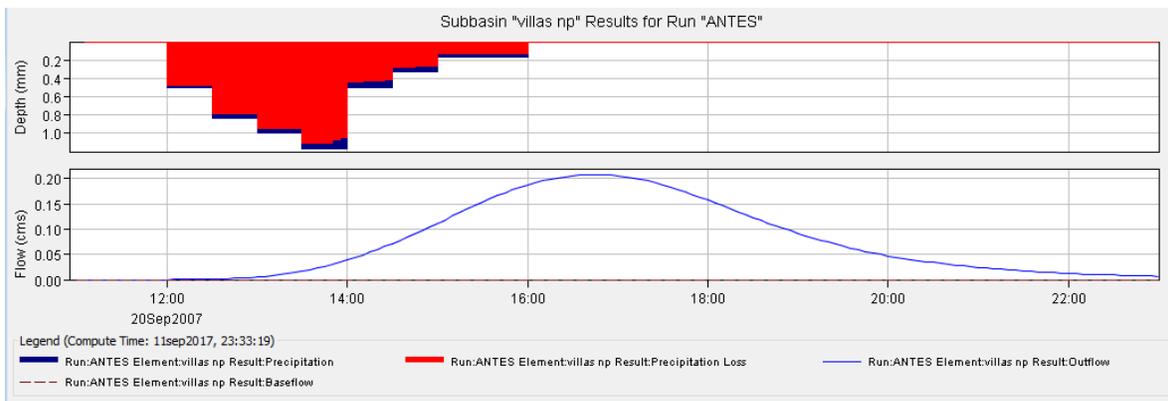


Figura 28 Precipitación en exceso y pérdidas. HEC-HMS.

De la Figura 28 se puede ver que la mayor parte de la lluvia se pierde, o se infiltra, y la lluvia en exceso o precipitación que escurre es mínima. Por lo que es importante que se conserve este sitio por ser importante para la infiltración o recarga del acuífero.

## 7.5.2 ANALISIS DEL ESCURRIMIENTO CON URBANIZACIÓN

El fraccionamiento “Villas del pedregal” está ubicado en la zona poniente de la ciudad de Morelia, Mich. De acuerdo con el CENSO 2010 del INEGI, está ubicado en la longitud 101.1813° W y latitud 19.4101° N, con una altitud promedio de 1946

m. Para el año 2010 la población total del conjunto habitacional Villas del Pedregal es de 10,934 habitantes. Se puede apreciar que es una gran concentración de personas, las cuales son principalmente familias trabajadoras.

El fraccionamiento es de tipo Interés social, lo cual quiere decir que las viviendas tienen un tamaño pequeño con poca construcción (40 m<sup>2</sup> en promedio). De acuerdo con el CENSO 2010 del INEGI, existen en el conjunto habitacional Villas del Pedregal un total de 7535 viviendas. Este es un número importante de casas que pueden ser utilizadas dentro del tren de gestión de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. De acuerdo con los datos de grupo HERSO, que es la empresa desarrolladora inmobiliaria que llevó a cabo la construcción de las viviendas en este desarrollo habitacional, existen 4 modelos de vivienda. El Cacao-VII con 43.5 m<sup>2</sup> de construcción, Mora, con 60.80 m<sup>2</sup> de construcción, el Nexpa con 52.5 m<sup>2</sup> de construcción y el San Nicolás con 60 m<sup>2</sup> en la planta alta.



Figura 29 Imagen de Satélite de Villas del Pedregal.

La Figura 29 da cuenta que la vegetación en el fraccionamiento es muy poca, de hecho las zonas de vegetación son las que se ven alrededor del fraccionamiento.

Algunas de las vialidades del fraccionamiento presentan problemáticas de encharcamientos, lo cual hace que el acceso y el tránsito en las vialidades sea deficiente y peligroso con riesgos de inundaciones.

Con la ayuda de imágenes satelitales, se identificaron las zonas cubiertas totalmente con concreto y aquellas zonas en las que existen netamente áreas con vegetación aparente. Como resultado de esto se obtuvo un mapa con dichas áreas.

*Tabla 1 Resumen de áreas*

FID	Shape *	Id	area	identifica
0	Polygon	0	1296888.41	zona urbana
1	Polygon	0	13697.28	vegetacion
2	Polygon	0	6913.61	vegetacion
3	Polygon	0	1312.58	vegetacion
4	Polygon	0	4262.18	vegetacion
5	Polygon	0	435.67	vegetacion
6	Polygon	0	267.39	vegetacion
7	Polygon	0	795.74	vegetacion
8	Polygon	0	9549.87	vegetacion
9	Polygon	0	5616.19	vegetacion
10	Polygon	0	4671.13	vegetacion
11	Polygon	0	5347.65	vegetacion
12	Polygon	0	5673.45	vegetacion

En la Tabla 1 se indican las áreas de vegetación y las zonas urbanas, como puede apreciarse, el área pavimentada es muy grande comparada con las áreas verdes, por lo cual es importante poder utilizar los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para contrarrestar o tratar de igualar las zonas en las que exista vegetación.

Para realizar el análisis de la situación con urbanización en el fraccionamiento villas del pedregal fue necesaria la utilización de imágenes de satélite obtenidas del programa HEC-RAS, con las cuales fue posible obtener el área del fraccionamiento, el porcentaje de áreas verdes, la geometría de las manzanas y calles, datos necesarios para poder determinar los coeficientes necesarios para realizar el cálculo del escurrimiento con las condiciones posteriores a la urbanización. La lluvia de diseño que se utilizó es la misma que en el análisis de las condiciones antes de la

urbanización, por lo que se podrá comparar de manera adecuada el incremento o decremento del escurrimiento.

Como ya se mencionó anteriormente la superficie cubierta con concreto es de 1 296 888.41 m<sup>2</sup> ó 129.70 ha. En contraparte, las áreas con vegetación aparente suman en total 58 542.74 m<sup>2</sup> ó 5.85 ha que representa en porcentaje un 4.0% (Figura 30) lo cual es algo mínimo considerando que las áreas verdes se encuentran en malas condiciones por lo que no funcionan realmente como un mecanismo de administración o de control del agua de lluvia ni ayudan a mitigar los efectos que las precipitaciones tienen en la infraestructura urbana.

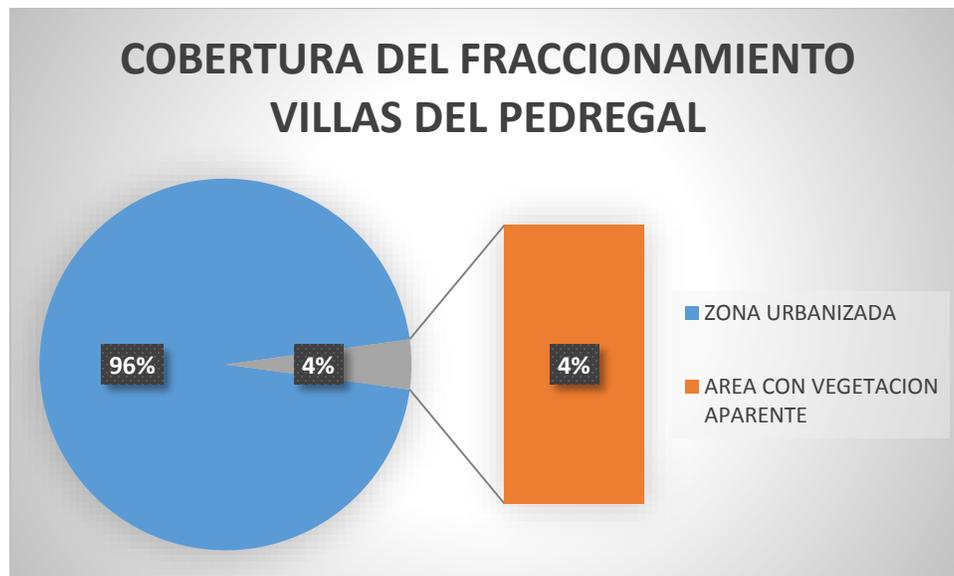


Figura 30 Porcentajes de cobertura en el Fraccionamiento Villas del Pedregal.

Las características de la micro cuenca para las condiciones actuales son:

- ◆ Área total 1.35 km<sup>2</sup>.
- ◆ Número de escurrimiento 92.
- ◆ Tiempo de concentración 78 min.
- ◆ Longitud del cauce principal 2.1 km.
- ◆ Pendiente de 1.15%
- ◆ Superficie impermeable del 96%.

Con las condiciones anteriores en el programa HEC-HMS, se obtuvieron los resultados de la precipitación.

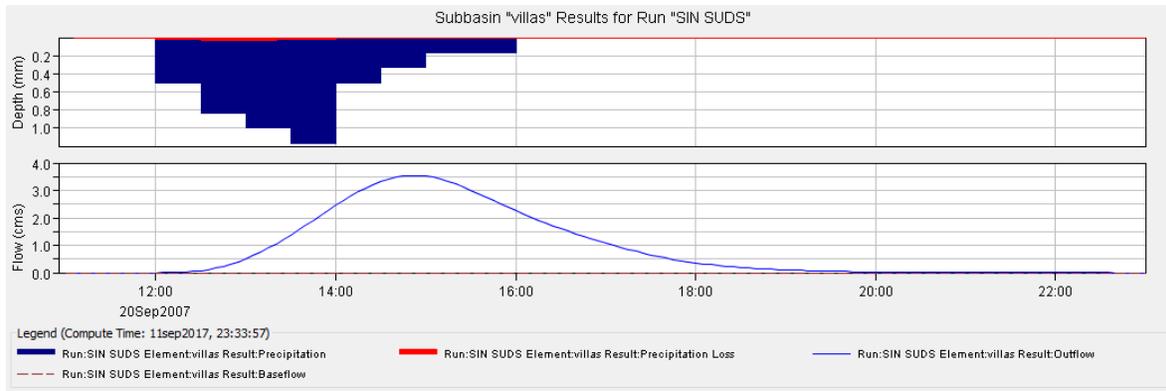


Figura 31 Escorrentía en la zona urbana. HEC-HMS

Vemos que el escurrimiento máximo se da a las 14:50 h, con un volumen de escurrimiento de 37 100 m<sup>3</sup>, y un gasto pico 3.5 m<sup>3</sup>/s. De la Figura 31 es posible concluir que casi el total de la lluvia escurre, causando niveles altos de escurrimiento que pueden provocar inundaciones.

### 7.5.3 PROPUESTA DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE.

De acuerdo con la información de las imágenes de satélite (Figura 29) es necesario "aislar" en cierto modo y en la medida de lo posible el fraccionamiento, ya que los escurrimientos externos pueden aportar un gran volumen de escurrimiento al sistema, lo cual afectaría el dimensionamiento de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.

Como primera opción en los límites externos del fraccionamiento se propone la implementación de tiras filtrantes (Figura 33), las cuales ayudarán a que los escurrimientos externos no afecten o no entren en las calles saturándolas y desviando el agua de lluvia hacia aguas abajo y, a su vez, infiltrando al acuífero un porcentaje de agua.

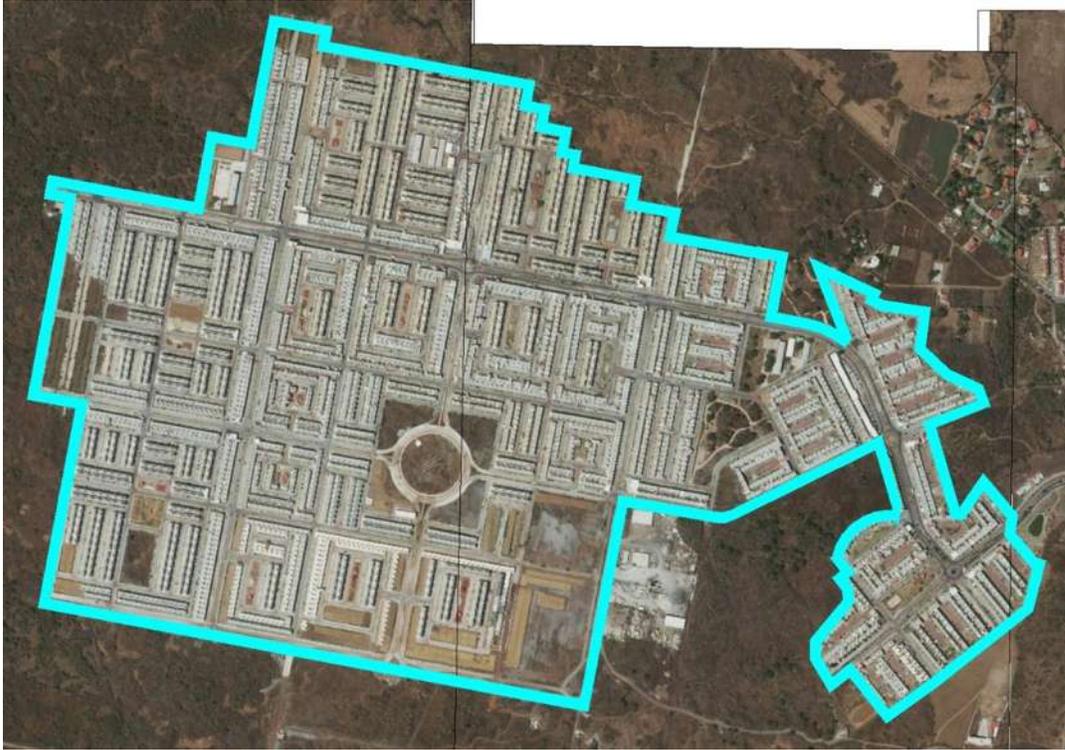
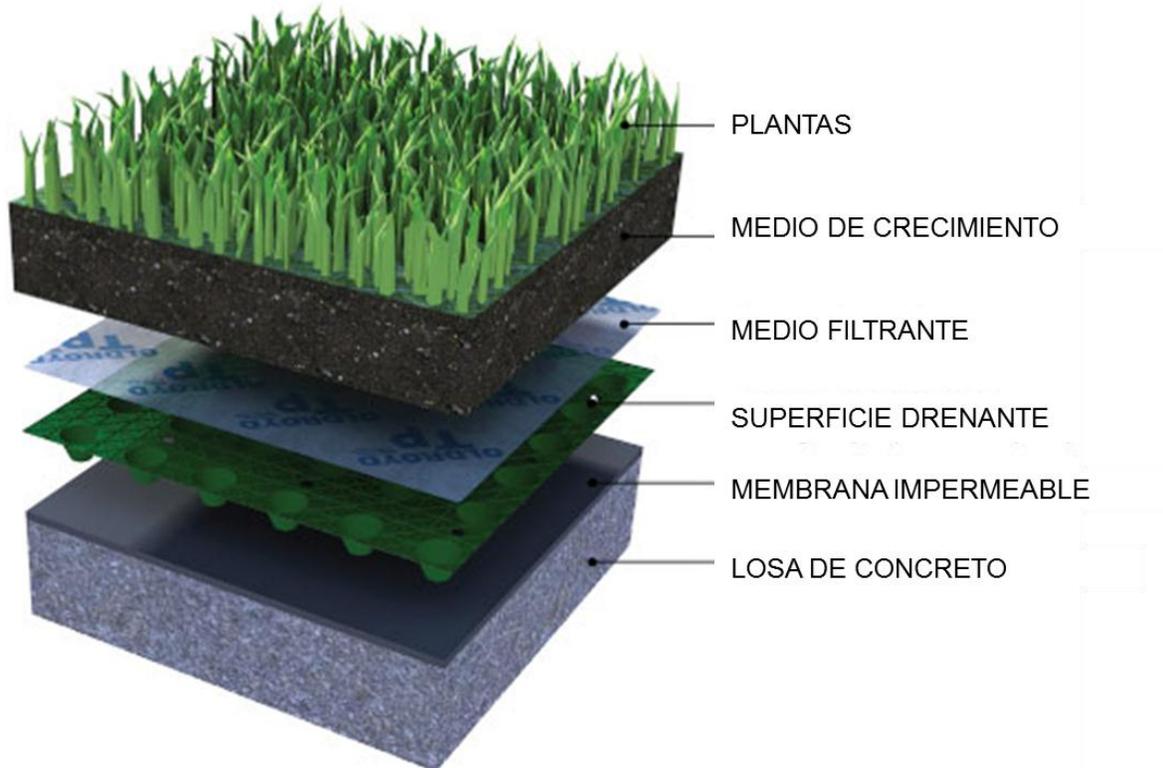


Figura 32 Ubicación de trincheras y zanjas de infiltración en el contorno del fraccionamiento



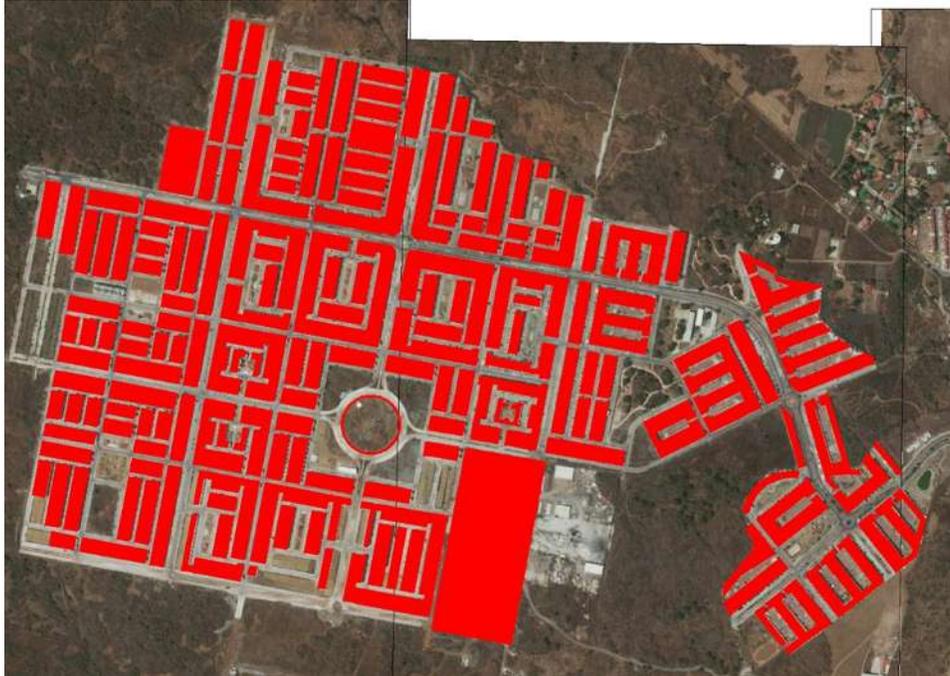
Figura 33 Ejemplo de una tira filtrante. Fuente: [www.susdrain.org](http://www.susdrain.org), agosto de 2016.

En segundo lugar se propone la utilización e implementación de techos verdes en casas y edificios de departamentos, cubriendo de un 30 a un 60% de la superficie de las azoteas. Esta es una gran aportación ya que incrementará enormemente la superficie cubierta de vegetación.



*Figura 34 Estructura típica de un techo verde.*

Es importante aclarar y mencionar que, si bien la utilización de techos verdes es una medida de mitigación de las afectaciones que el agua de lluvia tiene en la infraestructura urbana y como mecanismo de prevención de inundaciones, también es el Sistema Urbano de Drenaje Sostenible que más mantenimiento necesita, ya que para mantener el jardín de azotea en buenas condiciones primero se necesita una correcta y cuidadosa construcción (Figura 34) para que no haya infiltraciones de agua a las casas o se presenten problemas de humedad y, lejos de ser una solución, se convierta en un problema en las viviendas. En la Figura 35 se observan las viviendas en color rojo, las cuales tienen potencial para ser empleadas para construir techos verdes.



*Figura 35 Superficies construidas donde se pueden implementar los techos verdes.*

Aunado a lo anterior, se debe tener especial cuidado en el riego y mantenimiento de la azotea verde para que no se seque y se mantenga viva la vegetación y con esto mejore el confort dentro de las viviendas al controlar la temperatura dentro de las mismas y volviendo el entorno más agradable a la vista.



*Figura 36 Perspectiva de una de las calles del fraccionamiento Villas del Pedregal.*

Como se observa en la Figura 36, existe una pequeña cantidad de área verde en los estacionamientos de las viviendas. También puede observarse en la Figura 36 que la tendencia de los habitantes es a construir una cochera techada que proteja sus vehículos y pueda servir, a su vez para ampliar sus viviendas. Es aquí donde es necesaria la implementación de vados (Figura 37) en los extremos de las calles para poder conducir el agua de lluvia y permitir en un pequeño porcentaje la infiltración de la misma, reduciendo los escurrimientos directos en las calles y conduciéndolos sin mezclarlos con las aguas residuales, con esto se dejarán de saturar las tuberías de drenaje que es una de las problemáticas más fuertes que existen en el fraccionamiento.



Figura 37 Ejemplo de un vado. Fuente: [www.susdrain.org](http://www.susdrain.org), agosto de 2016

Los vados también pueden ser implementados en los camellones centrales de las avenidas principales cambiando el aspecto de las vialidades y dándoles funcionalidad y vida al entorno, haciendo, incluso, más confortable el tránsito por los mismos así como ayudando a reducir la peligrosidad de los escurrimientos en la vía pública.



*Figura 38 Camellón existente en una vialidad del Fraccionamiento Villas del Pedregal.*

En la Figura 38 se puede observar que existe espacio para llevar a cabo lo antes mencionado, se pueden implementar vados para el transporte del agua de lluvia, que a su vez permitan la infiltración y también se pueden implementar canales para captar el agua de lluvia y conducirla a zonas de retención en las que no afecten o no influyan en los escurrimientos directos en las calles reduciendo el riesgo de inundaciones.



*Figura 39 Ejemplo del estado de las áreas verdes en el Fraccionamiento Villas del Pedregal. Foto propia marzo de 2017.*

Como se aprecia en la Figura 39 las áreas verdes existentes se encuentran en muy mal estado, de hecho no tienen vegetación o están secas, en fin, en general no es la vegetación adecuada para el fin que los Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible buscan. Estas áreas verdes pueden ser utilizadas como barreras de detención, o incluso algunos que se encuentran en las zonas más bajas como humedales o cuencas de retención.

De acuerdo con lo anterior podemos resumir que de todos los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, esta propuesta obedece a los siguientes puntos:

1. Atendiendo a la problemática existente en primer lugar se debe aislar el fraccionamiento de las aportaciones de escurrimientos externos por lo que las zanjas de infiltración ayudarán en este sentido. Actualmente la zanja de

infiltración es de 7 272 m de longitud. La zanja de infiltración conducirá al único acceso que actualmente tiene el camino, descargando en terrenos aledaños o en el drenaje pluvial de la carretera.

2. Se implementarán sistemas de techos verdes, que reducirán el volumen de escorrentía en las calles del fraccionamiento, a su vez, este sistema de control en el sitio permitirá que el volumen de escorrentía sea desalojado en un mayor tiempo. El área de los techos verdes corresponde a 0.44 km<sup>2</sup>.
3. Como tercer parte, se propone la construcción de vados y canales dentro de las vialidades, aprovechando las pequeñas áreas verdes que existen tanto en camellones, como en banquetas, con esto se podrá conducir el agua de lluvia fuera del fraccionamiento. Cabe destacar que los vados y canales se diseñan para que exista vegetación en ellos, con lo que se conducirá el agua de lluvia, pero también se podrá reducir el volumen de escorrentía y la velocidad de la misma. El área determinada por estos sistemas es de 0.15 km<sup>2</sup>.
4. Finalmente se propone la rehabilitación de las áreas verdes para poder ser utilizadas como jardines de lluvia, barreras de retención y detención y que con esto puedan contribuir a la disminución del volumen de escorrentía que se desaloja en las calles. Esto corresponde a 0.18 km<sup>2</sup>.
5. Estacionamientos en los que se considera la sustitución del pavimento existente por un pavimento permeable, con lo que se aumentaría en gran cantidad las zonas permeables. El área que se considera es de 0.045 km<sup>2</sup>.

Es importante destacar que debido a la infraestructura existente en la zona se dificulta la implementación de otros tipos de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Entre estos SuDS que no se pueden implementar destacan la captación de agua de lluvia. La captación del agua de lluvia es importante porque con ella aparte de detener el agua de lluvia y almacenarla en los hogares de las personas, se reduce el volumen de escurrimiento en las calles, por lo que se pueden tener 2 soluciones con la implementación de un solo sistema. Otro sistema que es difícil implementar son las cuencas de detención, ya que requieren un área más grande y tienen que contemplarse desde la construcción del fraccionamiento para poder

detener y almacenar la escorrentía, que puede ser infiltrada al acuífero, se puede utilizar para abastecer al mismo fraccionamiento o puede utilizarse en actividades como la agricultura o la ganadería. Finalmente es difícil, también, la implementación de tanques geocelulares dentro del fraccionamiento ya que estos deben estar en la zonas altas para almacenar y distribuir de manera más lenta la escorrentía.

Todos los sistemas antes mencionados tienen como problemática el espacio para su construcción debido a que su dimensionamiento es de gran capacidad. Es por eso que resulta complicado, más no imposible, pero requiere de una mayor participación de la sociedad y del gobierno.

De esta manera, se llevó a cabo el cálculo del número de escurrimiento teniendo en cuenta las diferentes zonas que se propone rehabilitar. De entrada se observa un crecimiento en la zona permeable, teniendo ahora un 60% del total del área.

Para poder calcular el número de curva o número de escurrimiento es necesario poder conocer las características de los nuevos elementos.

*Tabla 2 Cálculo del número de escurrimiento para la micro cuenca con SuDS*

ELEMENTO	PORCENTAJE (%)	*N (Aparicio, 2009)	N PONDERADA
ZONA IMPERMEABLE	40	92	36.8
AREAS VERDES	13.3	71	9.443
ESTACIONAMIENTOS	3.3	70	2.31
TECHOS VERDES	32.6	78	25.428
CANALES Y VADOS	10.8	89	9.612

\* N = Número de escurrimiento

En total se obtuvo una N de 83.593. Por lo que utilizaremos un valor de 83. De esta manera, los datos de calibración de la micro cuenca para las condiciones con SuDS son los siguientes:

- ◆ Área total 1.35 km<sup>2</sup>.
- ◆ Número de escurrimiento 83.
- ◆ Tiempo de concentración 110 min.

- ◆ Longitud del cauce principal 2.1 km.
- ◆ Pendiente de 1.15%
- ◆ Superficie impermeable del 40%.

Con los datos anteriores se obtuvieron datos muy interesantes, de los cuales destacan los que se observan en la Figura 40, en la que se observa que existe una mayor infiltración del agua de lluvia. Se observa también que se incrementa el tiempo en el que escurre el agua de lluvia, por lo que el volumen del escurrimiento se desaloja más lentamente. El volumen de escurrimiento es de 18 700 m<sup>3</sup> y el gasto pico es de 1.5 m<sup>3</sup>/s.

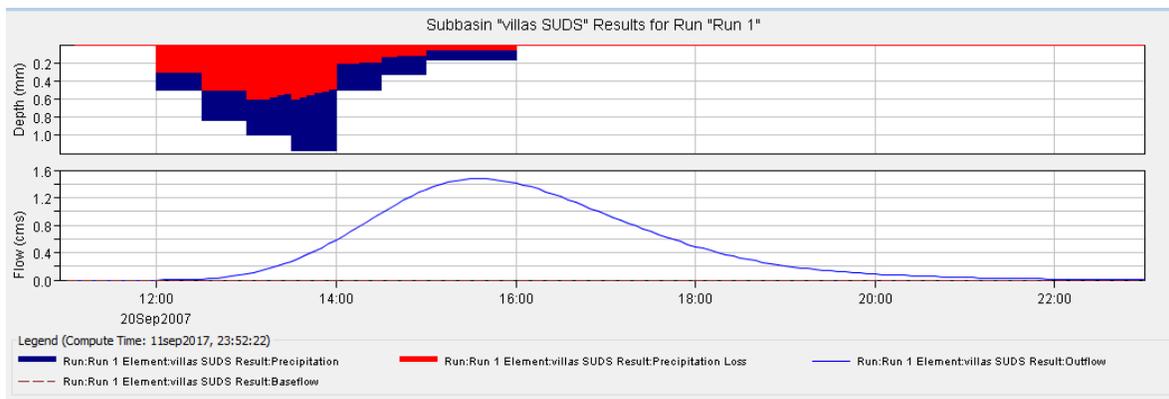
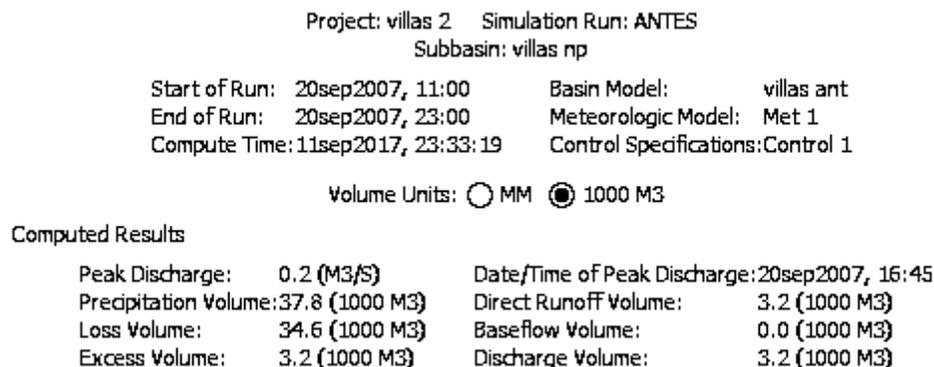


Figura 40 Resultados del análisis con la propuesta de SuDS

## 8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En el capítulo anterior, se llevó a cabo la revisión del área en la que está ubicado el fraccionamiento Villas del Pedregal. El análisis tuvo lugar en tres escenarios distintos, los cuales corresponden a las diferentes fases comparativas en las que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible intervienen. En primer lugar se hace mención al objetivo principal que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible tienen el cual es que dichos sistemas tratan de igualar o imitar las condiciones iniciales que tenía el terreno natural antes de su urbanización (Figura 41), es decir, cuando existía vegetación natural, el suelo original y la morfología que permitía un funcionamiento de drenaje adecuado y adaptado para el entorno particular y exclusivo de ese sitio. Así pues, se realizó el análisis de las condiciones originales existentes en la zona previo a la construcción del fraccionamiento, lo anterior con la información de las cartas topográfica y de uso de suelo E14A23 correspondiente al municipio de Morelia, que es donde está ubicado el fraccionamiento villas del pedregal.



*Figura 41 Resultados del análisis antes de a urbanización. (HEC-HMS)*

Posteriormente, se llevó a cabo la revisión de las condiciones actuales del fraccionamiento, obteniendo el área pavimentada de las calles, el área de las casas, la cual corresponde a una superficie impermeable, las áreas verdes y las áreas de estacionamiento que pudieran ser potencialmente utilizadas para la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Los resultados pueden observarse en la Figura 42.

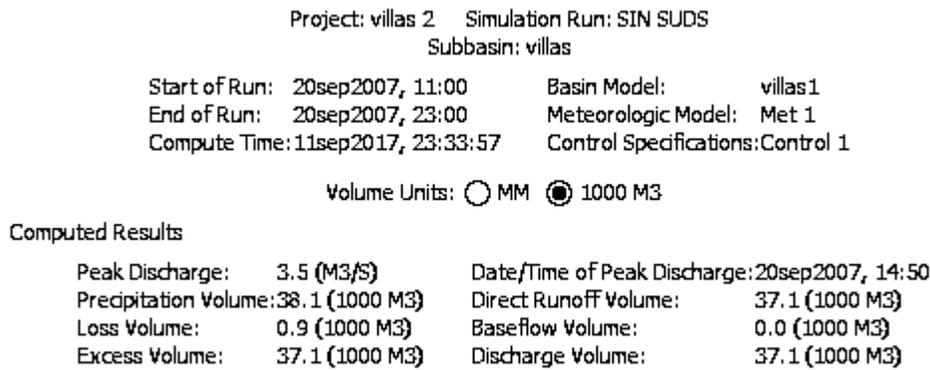


Figura 42 Resultados del análisis con las condiciones actuales de urbanización (HEC-HMS)

Finalmente se llevó a cabo la recomendación y propuesta de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el fraccionamiento Villas del pedregal y analizando las condiciones de escurrimiento con la implementación de los SuDS, tales como techos verdes, jardines de lluvia, vados y canales, zanjas de infiltración y pavimentos permeables, obteniendo los resultados que se pueden observar en la Figura 43.

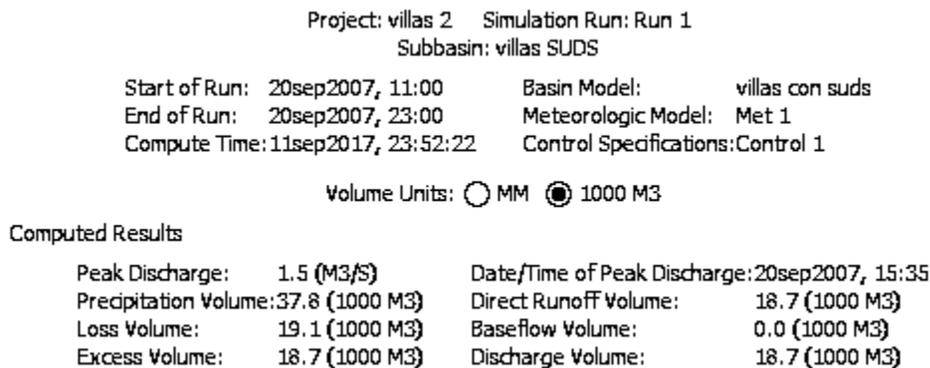


Figura 43 Análisis con la implementación de SuDS en el Fraccionamiento Villas del Pedregal. (HEC-HMS).

La primera diferencia que se encontró al llevar a cabo el análisis de los tres escenarios se encuentran resumidas en la Tabla 3.

Tabla 3 Condiciones de la microcuenca para los diferentes escenarios

<b>DIFERENTES CONDICIONES DE LA MICROCUENCA</b>			
<b>CONCEPTO</b>	<b>ANTES DE LA URBANIZACIÓN</b>	<b>SIN SUDS</b>	<b>CON SUDS</b>
<b>AREA (KM<sup>2</sup>)</b>	1.35	1.35	1.35
<b>LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (KM)</b>	2.1	2.1	2.1
<b>NUMERO DE ESCURRIMIENTO</b>	74	92	83
<b>TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (MIN)</b>	145	78	110
<b>PENDIENTE (%)</b>	1.5	1.5	1.5

Es importante destacar que para las diferentes condiciones el número de escurrimiento cambia y aunque en la mayoría de las expresiones utilizadas para el cálculo del tiempo de concentración únicamente se toma en cuenta la longitud del cauce principal y la pendiente, se utilizó la ecuación para el tiempo de concentración de la Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos, siendo la única que involucra el número de escurrimiento.

Una vez que se realizaron los análisis se pudieron observar distintas diferencias entre las condiciones de escurrimiento de los tres escenarios, los cuales se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4 Condiciones de escorrentía para los diferentes escenarios.

<b>DIFERENTES CONDICIONES DE LA MICROCUENCA</b>			
<b>CONCEPTO</b>	<b>ANTES DE LA URBANIZACIÓN</b>	<b>SIN SUDS</b>	<b>CON SUDS</b>
<b>GASTO PICO (m<sup>3</sup>/s)</b>	0.2	3.5	1.5
<b>VOLUMEN DE PRECIPITACIÓN (m<sup>3</sup>)</b>	37800	38100	37800
<b>PÉRDIDAS POR INFILTRACIÓN (m<sup>3</sup>)</b>	34600	900	19100
<b>PRECIPITACIÓN EN EXCESO (m<sup>3</sup>)</b>	3200	37100	18700

De acuerdo con la información obtenida y resumida en la Tabla 4, se observa que el gasto pico se reduce por encima del 50%, lo cual quiere decir que fluye menor cantidad de agua. También son perceptibles reducciones de más del 50% en la precipitación en exceso, es decir, en el volumen de agua de lluvia que escurre en las calles. Lo anterior puede interpretarse como una reducción de volumen y de

gasto que se traduce en un menor riesgo de inundaciones. Por contraparte, se observa un incremento de más del 100% en el volumen de agua que se infiltra al subsuelo para la recarga de los acuíferos. En este sentido se debe tener especial cuidado para que el agua que se infiltra sea de mayor calidad.

Existen disminuciones en los volúmenes de escurrimiento con la implementación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible, pero también la duración de la curva de escurrimiento ha sufrido variaciones en cuanto al volumen de escurrimiento directo y el tiempo en el que dicho volumen es desalojado. En la Figura 44 se observan las condiciones de flujo antes de la construcción del fraccionamiento. De igual manera en la Figura 45 se visualiza el flujo que existe actualmente, sin la construcción de ningún sistema de drenaje, más que el drenaje convencional que en muchas ocasiones resulta insuficiente. Finalmente en la Figura 46 se observa la disminución en el flujo con la implementación de la propuesta de SuDS, además, se ve la diferencia en los tiempos que tarda en desalojarse la precipitación en exceso, siendo un tiempo mayor para el caso de la implementación de SuDS que para el caso actual.

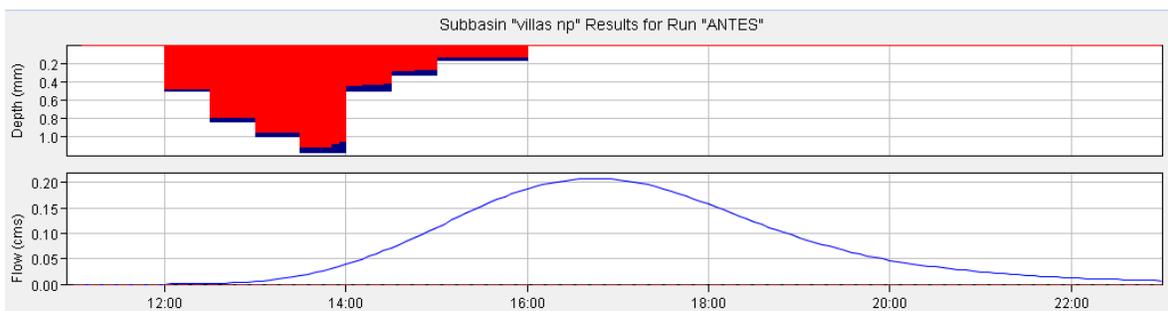


Figura 44 Flujo en condiciones originales.

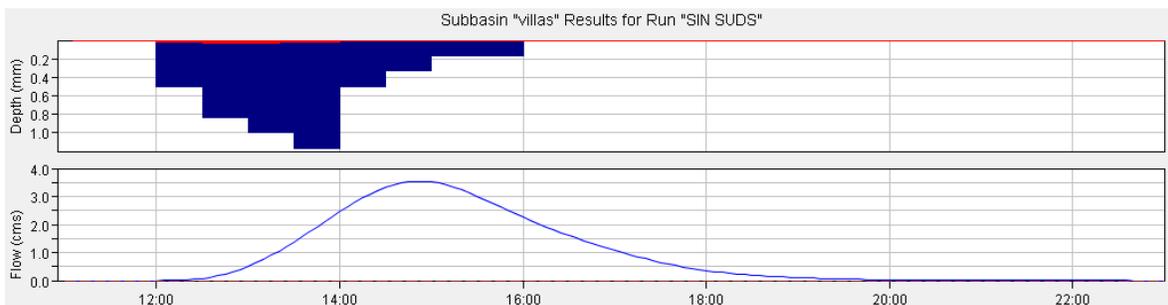


Figura 45 Flujo con la urbanización (estado actual)

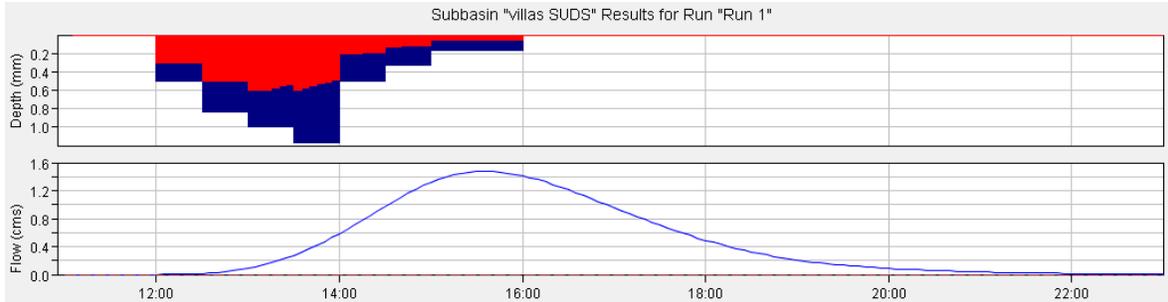


Figura 46 Flujo con la implementación de SuDS

En las condiciones originales de la micro cuenca, antes de la urbanización (Figura 44) se observa que existen gran cantidad de pérdidas debidas a la infiltración. El gasto pico para una lluvia que comienza a las 12:00 horas y termina a las 16:00 horas se da a las 16:45 horas y el flujo total se desaloja en promedio 11 horas después de haberse iniciado la precipitación. De manera análoga para las condiciones actuales de urbanización, se observa en la Figura 45 que casi el total de la precipitación escurre, y esto tiene lugar en un tiempo más reducido. El gasto pico se da a las 14:50, es decir 2 horas 50 minutos después de iniciada la precipitación. Esto se traduce como que en un menor tiempo se acumula una mayor cantidad de agua, causando problemas como inundaciones ya que se saturan las vías de transporte de escurrimiento pluvial, así como los drenajes que no están dimensionados para conducir el caudal pico que representa esta lluvia. Por el contrario, en la Figura 46 se aprecia que el tiempo del máximo volumen de escurrimiento se da a las 13:35 horas, 1 hora y 35 minutos después de que se inició la lluvia y se termina de ser desalojado 10 horas después de que se inició la lluvia, caso contrario a las condiciones sin SuDS ya que el volumen se desaloja 7 horas 30 minutos después de que inicia la lluvia. Con lo anterior se constata que al implementar los sistemas urbanos de drenaje sostenible se incrementa el tiempo en el que se desaloja el volumen de escurrimiento y este volumen se disminuye debido a que existen mayores fuentes de infiltración con lo cual se ve reducido en más de un 50% el volumen de agua de lluvia que será depositado en las calles y que es fuente potencial de catástrofes como las inundaciones.

---

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el análisis de las diferentes condiciones para el mismo sitio en el que se encuentra el fraccionamiento Villas del Pedregal, es posible concluir que se cumple con los objetivos planteados al inicio de esta investigación, en los cuales se buscaba probar que los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible sirven como mecanismo de administración y control del agua de lluvia en entornos urbanos, reduciendo el volumen de escurrimiento pluvial que pudiera fluir a las calles e incrementando el tiempo en que dicho volumen es desalojado, reduciendo con esto el riesgo de inundaciones, los gastos en el bombeo del agua que se estanca y se almacena en los puntos bajos de los fraccionamientos y el costo de mantenimiento en calles y caminos debido a los problemas que las lluvias ocasionan.

Se determinó que de acuerdo con la topografía de la ciudad es factible la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y esto depende también de la problemática puntual de cada una de las zonas de la ciudad. El particular se analizó el fraccionamiento Villas del Pedregal, pero los resultados pueden ser replicables en diferentes zonas de la ciudad de Morelia.

Ahora bien, ya se hizo mención de los beneficios que implica la construcción de Sistemas Urbanos de drenaje sostenible, pero estos sistemas no trabajan por sí mismos. Es de vital importancia que se concientice a la población acerca de los beneficios que tienen estos sistemas y el mantenimiento que ellos requieren para su correcto funcionamiento. Es por eso que se requiere hacer énfasis y tener especial cuidado en implementar políticas orientadas a incentivar la construcción de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, pero también a llevar a cabo un manual de operación y mantenimiento de los mismos para que puedan cumplir con su función y no convertirse en un problema a posteriori.

Finalmente es importante destacar que lo planteado en la hipótesis, “La implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SuDS) dentro de la ciudad de Morelia contribuye a administrar el agua de lluvia y con ello disminuir el volumen de escurrimientos pluviales, que son los principales causantes de las

inundaciones”, es cierta ya que como se observa en el capítulo de análisis de resultados, el volumen de escurrimiento se vio disminuido, el tiempo en que dicho escurrimiento se aumentó, se disminuyó el gasto pico, variables que influyen de manera directa en la causa de inundaciones dentro de los entornos urbanos.

Entonces, la construcción de los Sistemas urbanos de drenaje sostenible es factible desde el punto de vista técnico, debido a las características ya mencionadas en párrafos anteriores pero hay que tener en cuenta las siguientes recomendaciones.

- a) Para que los Sistemas urbanos de drenaje sostenible tengan un funcionamiento óptimo, deben ser diseñados por un experto en el tema, teniendo una visión holística de la problemática para poder emplear los materiales y técnicas de construcción adecuadas para que los SuDS puedan tener una larga vida útil y resolver la problemática que en una región en particular se presente.
- b) Es importante vincular a la sociedad civil en general a fin de que tomen estos sistemas como una solución a la problemática de inundaciones en las ciudades pero, teniendo en cuenta que requieren de un mantenimiento preventivo para un funcionamiento óptimo.
- c) De igual manera, el gobierno local debe contribuir a una mejora continua de estos servicios, estableciendo la normativa básica para construcción, operación y mantenimiento de los sistemas con el fin de que se utilicen de manera adecuada e incluso dando incentivos a la sociedad con la finalidad de que se implementen y contribuyan al bien común.

---

## 10. REFERENCIAS

### BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, C. et al. (1988), Ciudades mexicanas en la época colonial, Exposición temporal, Museo Nacional de Historia, Castillo de Chapultepec, México, INAH/SEP.

APRARICIO, FRANCISCO. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México, 2009.

ARREYGUE – ROCHA E., et al., 2004. Eventos Excepcionales e inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán; Ciencia Nicoláita, Morelia, [s.n.], 12-15.

BASALENQUE, D. (1963), Historia de la Provincia de San Nicolás de Tolentino de Michoacán, del Orden de N.P.S. Agustín, México, Ed. Jus.

CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN. La situación demográfica de México 2006. Ciudad de México: Fondo Nacional de Población (UNFPA), 2006.

HUMBOLDT, A. (1984), Ensayo político sobre el reino de la Nueva España, México, Editorial Porrúa.

HERNANDEZ, JUAN Y VIEYRA ANTONIO. Riesgo por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana. ¿El desastre nace o se hace?. Revista de geografía norte grande, 47; 45-62. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI). Guía para la interpretación de cartografía Edafología. Aguascalientes, Ags. 2008.

LEMOINE, E. (1962), “Documentos para la historia de la ciudad de Valladolid, hoy Morelia (1541-1624)”: 1-98.

SENER (2016) Evaluación Rápida del Uso de la Energía. Morelia, Michoacán, México. Secretaría de Energía, Banco Mundial, ESMAP, TRACE, 2016.

TAPIA, C. y VARGAS, G. El impacto del desarrollo urbano en los recursos naturales. Cuadernos de Investigación y Difusión, 2006, vol. I.

United States. Environmental Protection Agency (1999) Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices, [online] <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/stormwater/>.

United States. Environmental Protection Agency (2008) Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies.[online] <http://www.epa.gov/hiri/resources/compendium.htm>.

VARGAS, G. (2011), "Población y poblamiento del partido de Valladolid-Morelia: 1541-1868", en: Hernández, J. y Vargas, C. (coords.), La Vida Cotidiana de los Michoacanos en la Independencia y la Revolución mexicana (pp. 85-102), Morelia, Centro de Documentación e Investigación de las Artes/SECUM.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., and Shaffer, P. (2007a) Site handbook for the construction of SUDS, Londres, CIRIA.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., and Shaffer, P. (2007b) The SUDS manual, Londres, CIRIA.

#### PÁGINAS WEB.

liama.upv.es. (2016). E2STORMED. [online] disponible en: [http://www.iiama.upv.es/iiama/index.php?option=com\\_content&view=article&id=98&lang=es](http://www.iiama.upv.es/iiama/index.php?option=com_content&view=article&id=98&lang=es) [visitada 10 Ago. 2016].

Social, C. (2017). Arranca Alfonso Martínez obra de saneamiento del Río Chiquito - H. Ayuntamiento de Morelia. [online] Morelia.gob.mx. Available at: <http://www.morelia.gob.mx/index.php/lista-de-comunicados/3854-2016-06-20-23-45-49> [Visitada 3 Feb. 2017].

Susdrain.org. (2016). SuDS components overview. [online] Available at: <http://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/suds-components.html> [Accessed 10 Aug. 2016].