



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA**

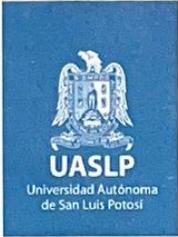
**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR SISTEMAS  
URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE EN LA ZONA INDUSTRIAL  
DE SAN LUIS POTOSÍ**

Que para obtener el grado de:  
Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:  
Mayra Vanessa Hernández Cortés

Asesor:  
Dr. Rodolfo Cisneros Almazán





18 de mayo de 2023

**ING. MAYRA VANESSA HERNÁNDEZ CORTÉS  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán**, *Asesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 18 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**“ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE EN LA ZONA INDUSTRIAL DE SAN LUIS POTOSÍ”**

Introducción.

1. Generalidades de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).
2. Delimitación geográfica, aspectos físicos y crecimiento histórico de la zona industrial de San Luis Potosí.
3. Evaluación del sistema de drenaje pluvial actual en el norte de la zona industrial.
4. Propuesta de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y la evaluación del impacto en el escurrimiento de aguas pluviales mediante el Storm Water Management Model (SWMM).
5. Análisis técnico y económico de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible propuestos.

Conclusiones.

Referencias.

**“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”**

**A T E N T A M E N T E**



**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN**  
**DIRECTOR.**

DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN



[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo.  
\*etn.

**“UASLP, más de un siglo educando con autonomía”**

## Agradecimientos

Agradezco sinceramente al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la invaluable beca que me otorgaron, permitiéndome llevar a cabo mis estudios de maestría. Mi profundo agradecimiento a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí** por brindarme la oportunidad de formar parte del posgrado de Tecnología y Gestión del Agua, donde he enriquecido mis conocimientos y habilidades.

Expreso mi reconocimiento al **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán**, cuya guía y asesoramiento fueron fundamentales en el proceso de creación y redacción de esta tesis. Sus aportaciones han sido de gran valor para el desarrollo de mi trabajo académico.

A mi familia, en particular a mi madre, **Azucena Cortés Anguiano**, le dedico un agradecimiento especial. Su amor incondicional y el constante respaldo tanto en el ámbito económico como moral han sido la base que han sustentado mi educación y crecimiento personal. A mi hermana **Azucena Hernández Cortés**, le agradezco por su apoyo constante a lo largo de todas las etapas de mi vida.

Extiendo mi gratitud a amigos que han sido pilares importantes, agradezco a mi mejor amigo, **Pablo Alcocer García**, por su continuo respaldo a pesar de la distancia. Asimismo, agradezco a mi amigo **Francisco Rafael Cifuentes López** por su amistad incondicional apoyo durante estos años lejos de mi estado natal. Su compañía ha significado mucho para mí y han hecho más llevadero este trayecto académico y personal.

## Resumen

El presente estudio se centra en los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), una alternativa al sistema de drenaje convencional diseñada para gestionar la escorrentía en áreas urbanas (I'Agua,2021). Se llevó a cabo un análisis detallado en la parte norte de la zona industrial del estado de San Luis Potosí, abarcando el periodo de 1990 a 2020, con el propósito de comparar y evaluar el crecimiento urbano en dicha región. Posteriormente se ejecutó un análisis hidrológico de la zona industrial y se modeló el sistema de drenaje pluvial existente mediante el programa SWMM® para examinar su comportamiento hidrológico.

La propuesta incluyó la identificación y la aplicación de SUDS apropiados, considerando las características específicas de las subcuencas. La comparación de los resultados obtenidos de ambos enfoques reveló reducciones significativas, alcanzando hasta un 70% en el escurrimiento de las subcuencas. El crecimiento urbano en la zona industrial se incrementó en un 90%, generando un escurrimiento de hasta 9000 litros por segundo en la parte norte, canalizándose hacia los colectores de las avenidas principales.

La evaluación financiera del proyecto reveló una Tasa Interna de Retorno (TIR) positiva del 1.92% destacando la solidez económica del proyecto. Esta cifra sugiere que, a una tasa de descuento de 1.92%, el proyecto no solo cubre los costos asociados, si no que también genera un retorno adicional.

Los beneficios técnicos, que incluyen mejoras significativas en la capacidad operativa de los tubos y reducción en el factor de inundación, han contribuido de manera integral al éxito y sostenibilidad del proyecto.

**Palabras clave:** *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, crecimiento urbano, análisis hidrológico, modelado SWMM®, Tasa de Rentabilidad Inmediata, gestión de escurrimiento.*

## Contenido

Agradecimientos .....	3
Resumen .....	4
Índice de Figuras .....	9
Índice de Tablas .....	13
Introducción .....	15
Preguntas de investigación .....	17
Hipótesis .....	17
Objetivo general .....	17
Objetivos específicos .....	17
CAPÍTULO 1. Generalidades de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)..	18
1.1 El ciclo natural del agua y la urbanización .....	18
1.2 Definición de SUDS.....	19
1.3 Importancia de la gestión de las escorrentías.....	20
1.3.1 Contaminación de la precipitación y su impacto en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). .....	21
1.4 Diferencia entre los SUDS y los sistemas de drenaje tradicional .....	21
1.5 Beneficio de los SUDS .....	22
1.6 Tipos de SUDS.....	23
1.6.1 Pavimentos permeables.....	23
1.6.2 Cubiertas verdes.....	25
1.6.3 Pozos de infiltración y zanjas de infiltración .....	26
1.6.4 Estanques de infiltración .....	28
1.6.5 Áreas de biorretención.....	30
1.6.6 Filtros de arena.....	31
1.6.7 Sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL).....	32
1.6.8 Drenes filtrantes o drenes franceses.....	34
1.6.8.1 Cunetas verdes.....	35
1.6.8.2 Franjas filtrantes .....	36
1.6.9 Depósitos de detención.....	38
1.6.10 Estanque de detención .....	39
1.6.11 Humedales artificiales .....	40
1.7 Ejemplos de SUDS.....	42
1.7.1 Ejemplos de SUDS en espacios urbanos.....	42
1.7.1.1 Reino Unido .....	42

1.7.1.2 Estados Unidos.....	42
1.7.1.3 Australia.....	43
1.7.1.4 Madrid.....	44
1.7.1.5 Japón.....	46
1.7.2 Ejemplos de SUDS en industrias .....	47
1.7.2.1 Parque comercial Oleiros (La Coruña, España) .....	47
1.7.2.2 Nave industrial (Daganzo de Arriba, Madrid).....	49
1.7.2.3 Nave industrial Carrefour (Azuqueca de Henares) .....	50
1.7.2.4 Planta Praxair, Vallecas .....	52
1.7.2.5 Industria alimenticia en San Luis Potosí.....	53
CAPÍTULO 2. Delimitación geográfica, aspectos físicos y crecimiento histórico de la zona industrial de San Luis potosí. ....	54
2.1 Ubicación de la zona industrial .....	54
2.2 Crecimiento de la zona industrial y cambio de uso de suelo.....	55
2.3 Aspectos físicos .....	58
2.3.1 Orografía y topografía.....	58
2.3.2 Geología.....	58
2.3.3 Edafología.....	59
2.3.4 Hidrología .....	61
2.3.4.1 Hidrología superficial.....	61
2.3.4.2 Hidrología subterránea.....	63
2.3.5 Clima .....	64
CAPÍTULO 3. Evaluación del sistema de drenaje pluvial actual en el norte de la zona industrial. ....	65
3.1 Ubicación del área de estudio (Norte de la zona industrial) .....	65
3.2 Análisis hidrológico de la cuenca urbana.....	67
3.2.1 Estaciones climatológicas en la región de estudio .....	67
3.2.1 Estimación de datos faltantes .....	68
3.2.2.1 Método de la relación normalizada.....	68
3.2.2.2 Método racional deductivo .....	69
3.2.3 Pruebas de homogeneidad e independencia .....	72
3.2.3.1 Prueba de Helmer (Homogeneidad).....	72
3.2.3.2 Prueba de Anderson (Independencia).....	72
3.2.4 Cálculo de la precipitación máxima probable (PMP) e Intensidad de lluvia .....	74
3.2.5 Curvas I-D-Tr .....	77

3.2.6 Hietograma de diseño .....	81
3.3 Sistema de drenaje pluvial actual .....	85
3.3.1 Programa Storm Water Management Model (SWMM) .....	85
3.3.2 Modelo conceptual en SWMM .....	86
3.3.2.1 Resultados basados en supuestos.....	86
3.3.2.2 Ubicación de colectores en el área de estudio .....	87
3.3.2.3 Líneas de flujo.....	90
3.3.2.4 Trazo de subcuencas en SWMM .....	91
3.3.2.5 Parámetros hidrológicos utilizados en SWMM .....	100
3.3.3 Resultados de la escorrentía del sistema de alcantarillado actual.....	102
3.3.3.1 Escorrentía urbana .....	102
3.3.3.2 Flujo de colectores.....	106
CAPÍTULO 4. Propuesta de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y la evaluación del impacto en el escurrimiento de las aguas pluviales mediante Storm Water Management Model (SWMM).....	111
4.1 Análisis para la selección de SUDS.....	111
4.2 Selección de SUDS en la zona de estudio .....	115
4.3 Diseño de SUDS .....	117
4.3.1 Pavimentos permeables.....	117
4.3.2 Cuenca de retención.....	118
4.3.3 Sistemas de captación de agua de lluvia .....	119
4.4 Modelación del sistema de alcantarillado pluvial actual considerando los SUDS..	125
4.4.1 Integración de los SUDS al programa .....	125
4.4.2 Parámetros de los SUDS en SWMM.....	128
4.4.3 Resultados comparando el sistema de drenaje pluvial actual y agregando SUDS en subcuencas y colectores.....	131
CAPÍTULO 5. Análisis técnico y económico de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible propuestos. ....	145
5.1 Estimación de costos de los SUDS .....	145
5.1.1 Catálogo de conceptos y precios unitarios .....	145
5.2 Presupuesto final de obra.....	152
5.3 Impacto económico del uso del agua captada.....	154
5.3.1 Costo de mantenimiento .....	154
5.3.2 Proyección del costo de agua ahorrada por la implementación de los SUDS .....	155
5.4 Viabilidad económica.....	156

5.4.1 Valor Actual Neto (VAN) .....	156
5.4.2 Tasa Interna de Retorno (TIR) .....	156
5.4.3 Valor residual (VR).....	157
5.4.4 Cálculo del VAN y TIR del proyecto .....	158
5.5 Análisis de factibilidad técnica del proyecto .....	160
Conclusiones .....	168
Recomendaciones.....	170
Referencias .....	172

## Índice de Figuras

Figura 1.	Aumento de la escorrentía como efecto de la urbanización. (EPA, 2008) .....	19
Figura 2.	Sección de un pavimento permeable (Xiaoqian, 2020).....	24
Figura 3.	Partes de una cubierta verde (Rodríguez, 2017) .....	26
Figura 4.	Zanjas de infiltración (MINVU-DICTUC, 1996) .....	28
Figura 5.	Estanque de infiltración (MINVU-DICTUC, 1996) .....	29
Figura 6.	Sección transversal de área de bio-retención (Pérez, 2017) .....	30
Figura 7.	Filtro de arena (Abellán, 2016) .....	31
Figura 8.	Sistema de Captación de Agua de Lluvia .....	33
Figura 9.	Drenes filtrantes. (Rodríguez,2017).....	34
Figura 10.	Cunetas verdes. (Rodríguez, 2017) .....	35
Figura 11.	Franjas filtrantes (MINVU-DICTUC,1996). .....	37
Figura 12.	Estanques de detención a gran escala. ....	38
Figura 13.	Estanque de retención en Fort Collins, Colorado, EE. UU. (MINVU-DICTUC, 1996). ....	40
Figura 14.	Esquema del sistema híbrido del humedal artificial (Rodríguez, 2017). ....	42
Figura 15.	Ejemplo de SUDS en New Jersey, EEUU.....	43
Figura 16.	Implementación del Green our city strategic action plan 2017-2021 en el recinto artístico y cultural de Melbourne .....	44
Figura 17.	Zona verde de la nueva sede de BBVA en Madrid (Peris García y Perales Momparker, 2016) .....	45
Figura 18.	Instalación de celdas de drenaje bajo pavimento permeable en el parque Gomeznarro (CONAMA, 2018) .....	46
Figura 19.	Proyecto G-Cans, alcantarillas en Tokio (Iagua, 2015) .....	47
Figura 20.	Parque comercial Oleiros (La Coruña, España). .....	48
Figura 21.	Nave industrial con SUDS en Daganzo de Arriba, Madrid. ....	49
Figura 22.	Sistema Stormtech de la nave industrial Carrefour (DRENATURA,2019). ..	50
Figura 23.	Nave industrial Carrefour en Azuqueca de Henares (El mercantil 2021).....	51
Figura 24.	La planta Praxair de Gases Industriales en Vallecas (DRENATURA,2017). 52	
Figura 25.	Implementación de humedal en industria alimentaria .....	53
Figura 26.	Ubicación de la Zona Industrial en San Luis Potosí México .....	54
Figura 27.	Mapa de uso de suelo en la zona industrial de San Luis Potosí año 2018 (Elaboración propia con información de CONABIO, 2023) .....	55
Figura 28.	Mapa de uso de suelo en la zona industrial de San Luis Potosí año 1990 (Elaboración propia con información de CONABIO, 2023) .....	56
Figura 29.	.....	56

Figura 30. Mapa de uso de suelo en la zona industrial de San Luis Potosí año 2011 (Elaboración propia con información de CONABIO, 2023).....	56
Figura 31. Mapa de uso de suelo en la zona industrial de San Luis Potosí año 2018 (Elaboración propia con información de CONABIO, 2023).....	57
Figura 32. Mapa de edafología en la zona industrial de San Luis Potosí, Elaboración propia con información del INEGI (2007) .....	59
Figura 33. Regiones hidrológicas en el estado de San Luis Potosí. Fuente: Ordenamiento Ecológico de San Luis Potosí, 2010. ....	61
Figura 34. Red hidrológica de la zona de estudio (Elaboración propia con información de INEGI) .....	62
Figura 35. Localización del acuífero 2411 (CONAGUA, 2020).....	63
Figura 36. Zonas inundables en el estado de San Luis Potosí (Elaboración propia con información de IMPLAN, 2021). ....	65
Figura 37. Ubicación del área de estudio en la parte norte de la zona industrial.....	66
Figura 38. Estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio, elaboración propia con información de CONAGUA.....	67
Figura 39. Curvas I-D-Tr Para el periodo de retorno de 2,5,10 y 25 años .....	80
Figura 40. Partes que conforman un hidrograma (Chow et al., 1994) .....	82
Figura 41. Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 2 años.....	84
Figura 42. Ubicación del sistema de alcantarillado pluvial actual.....	88
Figura 43. Curvas de nivel a cada 1.5 m en la zona de estudio .....	90
Figura 44. Líneas de flujo en la zona de estudio.....	91
Figura 45. Parámetros utilizados en las subcuencas en SWMM.....	94
Figura 46. Subcuencas para el Eje 120 en la parte norte de la zona industrial .....	97
Figura 47. Subcuencas para la Av. Promoción en la parte norte de la zona industrial .	98
Figura 48. Subcuencas para la Av. Industrias y en el Eje 118 en la parte norte de la zona industrial.....	99
Figura 49. Hietograma de diseño en SWMM .....	101
Figura 50. Parámetros de lluvia utilizados en SWMM.....	102
Figura 51. Ubicación del sistema de alcantarillado pluvial actual.....	103
Figura 52. Esguerrimiento pico de las subcuencas ubicadas en el Eje 120 de la zona industrial .....	104
Figura 53. Esguerrimiento pico de las subcuencas ubicadas en la Avenida Promoción de la zona industrial.....	104
Figura 54. Esguerrimiento pico de las subcuencas ubicadas en el Eje 118 y Avenida industrias en la zona industrial.....	105
Figura 55. Flujo de colectores Sección 1 en la Avenida Promoción .....	106
Figura 56. Flujo de colectores Sección 2 en la Avenida Promoción.....	107

Figura 57.	Flujo de colectores Sección 3 en la Avenida Promoción .....	107
Figura 58.	Flujo de colectores Sección 4 en el Eje 120.....	108
Figura 59.	Flujo de colectores Sección 5 en el Eje 120.....	109
Figura 60.	Flujo de Colectores Sección 6 en la Avenida Industrias.....	109
Figura 61.	Flujo de Colectores Sección 7 en la Avenida Industrias.....	110
Figura 62.	Flujo de Colectores Sección 8 en el Eje 118.....	110
Figura 63.	Propuesta de SUDS en el área de estudio.....	115
Figura 64.	Pendientes en la zona de estudio .....	116
Figura 65.	Propuesta de SUDS en el área de estudio (Pavimentos permeables, Cuencas de retención y SCALLS.....	117
Figura 66.	Corte del pavimento permeable .....	117
Figura 67.	Corte de la cuenca de retención. Elaboración propia.....	119
Figura 68.	Sistemas de captación de agua de lluvia en la zona de estudio.....	120
Figura 69.	Ejemplo del almacenamiento en SWMM .....	123
Figura 70.	Isométrico de instalación de captación de agua de lluvia.....	124
Figura 71.	Propiedades de las subcuencas .....	126
Figura 72.	Parámetros utilizados en los LID controls .....	127
Figura 73.	Parámetros utilizados en los SCALLS .....	128
Figura 74.	Parámetros utilizados en las cuencas de retención .....	129
Figura 75.	Parámetros utilizados en los pavimentos permeables .....	130
Figura 76.	Comparación de la escorrentía superficial de las subcuencas en la Av. Promoción .....	132
Figura 77.	Comparación de la escorrentía superficial de las subcuencas en el Eje 120 .....	134
Figura 78.	Comparación de la escorrentía superficial de las subcuencas en el Eje 118 y la Av. Industrias .....	136
Figura 79.	Comparación del flujo en los tramos de la Sección 1 .....	137
Figura 80.	Comparación del flujo en los tramos de la Sección 2.....	137
Figura 81.	Comparación del flujo en los tramos de la Sección 3.....	138
Figura 82.	Comparación del flujo en los tramos de la Sección 4.....	138
Figura 83.	Comparación del flujo en los tramos de la Sección 5.....	139
Figura 84.	Comparación del flujo en los tramos de la Sección 6.....	140
Figura 85.	Comparación del flujo en los tramos de la Sección 7 .....	140
Figura 86.	Comparación del flujo en los tramos de la Sección 8.....	141
Figura 87.	Interfaz de Neodata .....	145
Figura 88.	Costo de los SUDS por m <sup>2</sup> .....	153

Figura 89.	Propuesta de SUDS en la zona de estudio .....	160
Figura 90.	Comparación de la capacidad en los tramos T-8 y T-9 en la Av. Promoción.....	162
Figura 91.	Comparación de la capacidad en los tramos T-10 a T-13 en la Av. Promoción .....	163
Figura 92.	Comparación de la capacidad en los tramos T-20 y T-21 en el Eje 120....	164
Figura 93.	Comparación de la capacidad en los tramos T-54 y T-55 en la Av. Industrias.....	165
Figura 94.	Inundación en los nodos sin incorporar SUDS.....	167
Figura 95.	Inundación en los nodos incorporando SUDS.....	167

## Índice de Tablas

Tabla 1.	Climas en el municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021).....	64
Tabla 2.	Estaciones seleccionadas para la zona de estudio con las coordenadas Este y Norte (CONAGUA, sf).....	67
Tabla 3.	Estación 24179-Xoconoxtle presentando datos faltantes en su contenido ....	69
Tabla 4.	Estación 24179-Xoconoxtle datos faltantes completados.....	70
Tabla 5.	Resultado del análisis de homogeneidad e independencia .....	73
Tabla 6.	Estaciones seleccionadas para realizar los cálculos en la zona de estudio ....	74
Tabla 7.	Precipitaciones diarias máximas probables para distintas frecuencias .....	76
Tabla 8.	Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias.....	76
Tabla 9.	Intensidad de lluvia (mm/hr) según el periodo de retorno .....	78
Tabla 10.	Datos de partida para la construcción de las curvas I-D-Tr con los valores de Intensidad de precipitación según duración de la misma. ....	79
Tabla 11.	Hietograma para un periodo de retorno de 2 horas .....	83
Tabla 12.	Propiedades de los colectores en la parte norte de la zona industrial .....	88
Tabla 13.	Parámetros utilizados en las subcuencas.....	92
Tabla 14.	Coeficiente de Manning para escorrentía superficial .....	93
Tabla 15.	Propiedades usadas para cada subcuenca en SWMM .....	95
Tabla 16.	Metodología multiescala para la planificación de sistemas urbanos de drenaje sostenible .....	111
Tabla 17.	Calificación según la eficiencia en la eliminación de contaminantes y procesos relevantes .....	113
Tabla 18.	Puntuación asignada a los procesos evaluados de (0 a 5).....	114
Tabla 19.	Propiedades de los SCALL's en las subcuencas .....	121
Tabla 20.	Propiedades de los tanques utilizados .....	122
Tabla 21.	Cantidad y tipo de tanques de almacenamiento usados.....	123
Tabla 22.	Comparación del escurrimiento pico en el drenaje convencional y el drenaje convencional + SUDS en las subcuencas 4 a 21 .....	132
Tabla 23.	Comparación del escurrimiento pico en el drenaje convencional y el drenaje convencional + SUDS en las subcuencas 1,2,3,22,23,24,25 y 26.....	133
Tabla 24.	Comparación del escurrimiento pico en el drenaje convencional y el drenaje convencional + SUDS en las subcuencas 27 a 39 .....	135
Tabla 25.	Desempeño de los SUDS propuestos en la zona industrial.....	142
Tabla 26.	Presupuesto para los SCALL's.....	146
Tabla 27.	Presupuesto para las cuencas de retención .....	150
Tabla 28.	Presupuesto para los pavimentos permeables .....	151
Tabla 29.	Presupuesto final del proyecto .....	152

Tabla 30. Cálculo de la tasa interna de retorno.....	158
Tabla 31. Cálculo del valor actual neto .....	159
Tabla 32. Nivel de inundación en los nodos trazados en el programa SWMM .....	166

## Introducción

En el estado de San Luis Potosí, las inundaciones representan un desafío constante, siendo principalmente atribuibles a las precipitaciones pluviales de alta intensidad y corta duración. La topografía, caracterizada por las imponentes sierras de San Miguelito y Álvarez, acelera los tiempos de concentración de escurrimientos, agravando aún más la situación. A ello se suma la falta de infraestructura adecuada para la gestión y desvío de las aguas pluviales, así como el crecimiento descontrolado de la zona urbana.

El Atlas de Riesgo de San Luis Potosí (2011) destaca la urgencia de abordar estos problemas, señalando que el rezago en la implementación de infraestructuras propuestas previamente ha contribuido a la persistencia de inundaciones anuales.

En el ámbito municipal, la red de alcantarillado de San Luis Potosí se enfrenta a desafíos significativos. Según CONAGUA (2019), el sistema es de tipo combinado, gestionando tanto aguas residuales domésticas como pluviales en una única red de tuberías. Sin embargo, el diseño de esta red, calculado hace 50 años, opera mediante gravedad y no ha evolucionado a la par del crecimiento poblacional. La conexión de nuevos usuarios ha llevado a la saturación de la red principal.

A pesar de los esfuerzos para mitigar las inundaciones mediante obras hidráulicas, las afectaciones persisten anualmente, como señalan Pérez, Cisneros y Durán (2003). La falta de adaptabilidad de la infraestructura existente ante el aumento de la demanda ha dejado a la ciudad vulnerable ante eventos climáticos extremos.

En el ámbito industrial, donde la actividad económica es intensa, la existencia de colectores pluviales debería de mitigar el riesgo de inundaciones. Sin embargo, el PDUCP (2021) revela que el 32% del área industrial de San Luis Potosí aún se encuentra en riesgo de inundación, señalando deficiencias en la efectividad de las estructuras existentes.

En respuesta a este desafío, la presente tesis propone la implementación de SUDS en la parte norte de la zona industrial. Los SUDS representan una alternativa innovadora y complementaria a los sistemas de drenaje convencionales, abordando

la gestión de la escorrentía mediante técnicas que replican procesos naturales anteriores al desarrollo urbano. Estos sistemas incluyen elementos de captación, infiltración y almacenamiento estratégicamente e integrados al paisaje urbano (l'Agua,2021).

El enfoque metodológico de esta propuesta implica una serie de pasos clave. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis del crecimiento de la zona industrial entre 1990 y 2020 mediante el uso de imágenes satelitales. Posteriormente, se realizó un análisis hidrológico de la misma área utilizando herramientas como ArcGIS y QGIS. Este análisis proporcionó información crucial sobre el comportamiento hidrológico de la zona.

Para evaluar la efectividad del sistema de drenaje pluvial existente, se utilizó el programa SWMM (Storm Water Management Model) para analizar el flujo. A continuación, se propusieron estratégicamente SUDS en la zona de estudio mediante el mismo programa, permitiendo una comparación detallada de la escorrentía entre el sistema existente y el propuesto.

La combinación de análisis detallados, modelado hidrológico y evaluación económica busca ofrecer una propuesta robusta y holística para abordar los desafíos de inundaciones en la zona industrial de San Luis Potosí, contribuyendo así a la construcción de soluciones sostenibles y efectivas.

## Preguntas de investigación

¿Es factible el uso de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la zona industrial de San Luis Potosí que coadyuve en la disminución de la probabilidad de inundación?

¿Es factible introducir los SUDS en las industrias para que se pueda aprovechar el agua de lluvia en ellas?

## Hipótesis

El control y aprovechamiento de los escurrimientos en la zona industrial de San Luis Potosí son factibles técnica y económicamente mediante el uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.

## Objetivo general

Analizar la factibilidad técnica y económica de una propuesta de uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la parte norte de la zona industrial en San Luis Potosí, México.

## Objetivos específicos

- Analizar el crecimiento de la superficie de la zona industrial por medio de imágenes satelitales entre los años de 1990-2020.
- Realizar un análisis hidrológico de la cuenca urbana de la zona industrial de SLP usando Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Evaluar el sistema de drenaje pluvial existente en la parte norte de la zona industrial de San Luis Potosí a través del programa Storm Water Management Model (SWMM).
- Seleccionar modelos de SUDS que pueden ser incorporados en la parte norte de la zona industrial de San Luis Potosí por medio de un análisis multicriterio.
- Evaluar el sistema de drenaje pluvial incorporando sistemas urbanos de drenaje sostenible en la zona a través del programa Storm Water Management Model (SWMM).
- Analizar la factibilidad técnica y económica de uso de SUDS por medio de un análisis económico.

## CAPÍTULO 1. Generalidades de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

### 1.1 El ciclo natural del agua y la urbanización

La presión que se ha ejercido sobre los recursos hídricos a lo largo de la historia ha sido provocada en gran medida por el crecimiento urbano en las últimas décadas, lo cual puede derivar en una situación insostenible por la desproporción entre el uso del recurso natural y su capacidad de regeneración (Blanco, 2017).

Como se menciona en CIRIA (2015), la urbanización altera el paisaje natural y afecta los procesos hidrológicos de captación de agua. El ciclo natural del agua mantiene un balance de agua mediante la evapotranspiración, la precipitación, la infiltración/recarga de acuíferos y la absorción y transpiración de las plantas. La urbanización reduce la permeabilidad de la tierra, remplazando el drenaje libre del suelo con superficies impermeables, tales como tejados, carreteras, estacionamientos, etc. El desarrollo a veces elimina la vegetación natural que intercepta y drena la escorrentía devolviendo las aguas pluviales al aire y reduciendo la cantidad de agua que puede filtrarse en el suelo, lo que puede aumentar en gran medida la tasa de escorrentía superficial.

Dicho efecto puede observarse en la Figura 1, donde se evidencia el incremento de áreas impermeables que provoca un aumento en el coeficiente de escorrentía. En condiciones naturales durante un evento de lluvia, aproximadamente el 10% del agua se convierte en escorrentía, el 50% se infiltra y el 40% se evapora. Sin embargo, al reemplazar la vegetación natural por superficies impermeables que representan entre el 75% y el 100%, como el concreto o el asfalto, la escorrentía representa aproximadamente 55% del agua proveniente de la lluvia, mientras que solo el 15% se infiltra (EPA, 2008).

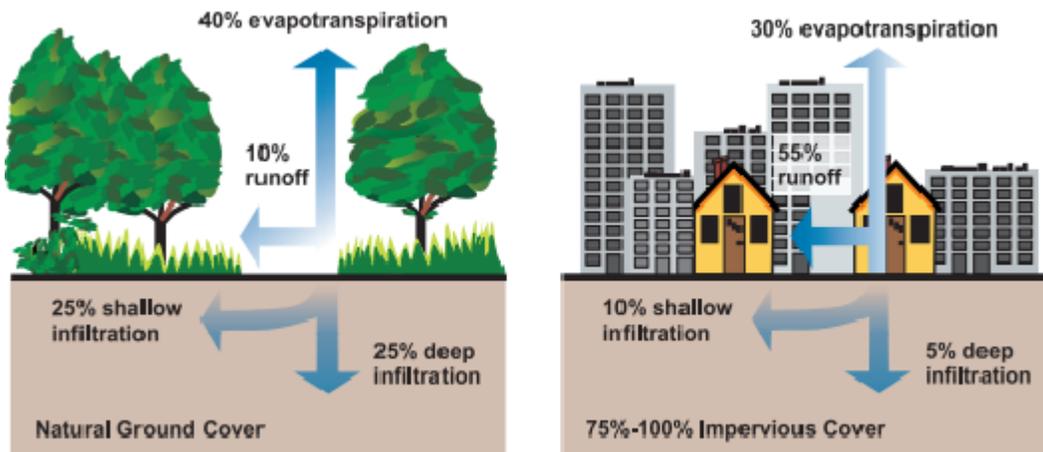


Figura 1. Aumento de la escorrentía como efecto de la urbanización. (EPA, 2008)

## 1.2 Definición de SUDS

Como se señala en l'Aigua (2021), los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son sistemas de drenaje alternativos que complementan a los sistemas convencionales y se encargan de gestionar la escorrentía generada en las superficies urbanas. Estos sistemas utilizan técnicas que imitan los procesos naturales previos al desarrollo urbano. Para lograrlo, integran estratégicamente elementos de captación, laminación y tratamiento en el entorno urbano.

Históricamente, el enfoque del drenaje urbano ha sido evacuar rápidamente las aguas pluviales de la ciudad mediante sistemas de alcantarillado que las conducen a cuerpos receptores naturales. Sin embargo, el crecimiento de las ciudades y, por ende, de las áreas impermeables, ha generado la necesidad de redes de drenaje cada vez más grandes, lo que ha llevado a problemas técnicos y económicos complejos (l'Aigua,2021).

Además, la calidad de la escorrentía generada suele ser perjudicial para el medio ambiente receptor, lo que plantea problemas relacionados con la calidad del agua y requiere de un consumo energético significativo para mejorar dicha calidad.

Los SUDS consiguen tres objetivos fundamentales, por un lado, reducen los volúmenes totales descargados a las redes de drenaje y al medio receptor al infiltrar y retener parte de la escorrentía; así mismo, pueden mejorar la calidad de las aguas descargadas a la red al aplicar tratamientos físicos, biológicos, etc.; y reducen los

caudales pico al detener temporalmente las escorrentías previniendo de este modo la saturación de las redes de drenaje (l'Aigua,2021).

También los SUDS aportan importantes beneficios derivados de su implantación en zonas verdes. Estos beneficios, pueden incluir ahorros energéticos (en bombeo y tratamiento de aguas), atenuación de la isla de calor urbana (gracias a la presencia de vegetación) o mejora de la calidad del aire (los procesos de respiración de las plantas contribuyen a la absorción de parte del CO<sub>2</sub> presente en la atmosfera) (l'Aigua,2021).

### 1.3 Importancia de la gestión de las escorrentías

De acuerdo con Pérez (2017) cuando la precipitación en una zona cae sobre un paisaje natural es absorbida por el suelo (se infiltra), se evapora y es recogida por las plantas (evapotranspiración) y algo de ella eventualmente escurre en las corrientes y ríos.

Estas fases del ciclo del agua pueden ser impedidas cuando la tierra es alterada por el desarrollo. En áreas urbanas tiende a existir menos suelo permeable disponible para infiltración y menos vegetación para la evapotranspiración. Cuando la precipitación cae en la superficie impermeable, la mayoría de esta se convierte en escurrimiento superficial, lo cual puede causar inundaciones, problemas de erosión y contaminación.

Existen investigaciones en este campo y muestran que si no se cambia el modo en se diseñan las áreas urbanas y la gestión de la escorrentía superficial de manera más efectiva, estos problemas empeorarán. Las proyecciones realizadas debidas al cambio climático muestran que es probable que las lluvias intensas y las inundaciones se volverán más frecuentes (Pérez,2017).

### 1.3.1 Contaminación de la precipitación y su impacto en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Como lo menciona Rodríguez (2017) durante las precipitaciones, el agua de lluvia se carga de contaminantes atmosféricos y al entrar en contacto con la superficie de una cuenca, se agregan otras sustancias contaminantes provenientes de actividades humanas, como polvo, suciedad, materia orgánica, metales pesados, pesticidas, entre otros. Además, esta agua de lluvia se contamina aún más al mezclarse con las aguas residuales urbanas.

En los periodos de lluvia, se producen impactos tanto en el medio ambiente receptor como en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Esto aumenta el riesgo a incumplir con las regulaciones de calidad del agua exigidas por la ley, principalmente debido al volumen máximo de agua que se debe de tratar en esos momentos de mayor precipitación (Rodríguez, 2017).

### 1.4 Diferencia entre los SUDS y los sistemas de drenaje tradicional

De acuerdo con Pérez (2017) si los SUDS son correctamente diseñados, construido y mantenidos, son mucho más sostenibles que los sistemas de drenaje convencionales ya que pueden mitigar muchos de los efectos adversos de una escorrentía de agua urbana en el ambiente. Esto se consigue:

- Controlando la tasa y los volúmenes de escorrentía, y por lo tanto disminuyendo el riesgo de inundaciones
- Reduciendo las concentraciones contaminantes.
- Ayudando en la recarga natural de acuíferos
- Contribuyendo a la mejora del valor estético de las áreas desarrolladas
- Proporciona hábitats para la vida animal salvaje en áreas urbanas y oportunidades para la mejora de biodiversidad.

## 1.5 Beneficio de los SUDS

Citando a CIRIA (2015), menciona una serie de beneficios que tiene el uso de SUDS:

- Los SUDS ofrecen un sistema de drenaje de alta calidad que ayuda a las áreas urbanas a enfrentar lluvias intensas y contrarresta los efectos negativos de la urbanización del ciclo del agua, como la disminución de la infiltración y la reducción de los recursos subterráneos.
- En los sistemas pueden mejorar la calidad de vida en las zonas urbanas y en desarrollo al hacerlas más dinámicas, atractivas visualmente, sostenibles y resilientes al cambio. Logran esto mejorando la calidad del aire, regulando la temperatura de los edificios, reduciendo el ruido y ofreciendo oportunidades recreativas y educativas. Un diseño de alta calidad de los SUDS, integrado en el diseño del desarrollo, puede atraer turismo e investigación generando crecimiento para el área local.
- Además de utilizar el espacio disponible de manera eficiente, los SUDS suelen tener un costo menor que la implementación de un sistema de tuberías subterráneas.
- Los SUDS protegen a las personas y propiedades del riesgo de inundaciones debido al desarrollo.
- Protegen la calidad de las aguas subterráneas y superficies al evitar la escorrentía contaminada.
- Salvaguardar los regímenes naturales de los ríos, lagos arroyos.
- Contribuyen al hábitat de la fauna local y los ecosistemas asociados, fomentando la biodiversidad.
- Mejoran la humedad del suelo y restablecen los niveles de los acuíferos agotados
- Proporcionan un valioso suministro de agua para la sociedad.
- Crean lugares atractivos donde las personas desean vivir, trabajar y disfrutar, al integrar el agua y espacios verdes con el entorno construido.

- Apoyan la creación de desarrollos capaces de adaptarse a los cambios climáticos.

## 1.6 Tipos de SUDS

### 1.6.1 Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables son una variante de pavimento que se diferencia del pavimento convencional en dos aspectos principales. La función principal de los pavimentos permeables es reducir el flujo superficial generado durante una tormenta al permitir la infiltración del agua a través de la capa de rodado. Esto resulta en una zona pavimentada permeable. La experiencia internacional en este tipo de pavimentos se ha centrado principalmente en el uso de una capa de rodado asfáltica con poco tránsito vehicular (MINVU-DICTUC,1996).

Como se señala en MINVU-DICTUC (1996) los pavimentos permeables son una opción efectiva para cumplir con varios de los objetivos básicos de las técnicas alternativas de drenaje urbano. A continuación, se mencionan los principales efectos de los pavimentos permeables en relación con estos objetivos:

- Disminuyen el caudal máximo: Este tipo de SUDS permiten la infiltración del agua de lluvia en el suelo, lo que reduce el caudal máximo de escorrentía y disminuye el riesgo de inundaciones.
- Disminuyen el volumen escurrido: Al permitir la infiltración del agua, los pavimentos porosos reducen el volumen de escorrentía que se dirige hacia los sistemas de drenaje, ayudando a mitigar el impacto de los sistemas de alcantarillado y evitando la sobrecarga de los mismos.
- Permiten otros usos alternativos: Los pavimentos porosos ofrecen la posibilidad de aprovechar el espacio pavimentado para usos alternativos, como áreas de recreación, espacios verdes o zonas de infiltración adicional. Esto contribuye a la optimización del uso del suelo urbano.
- Recargan las aguas subterráneas: La infiltración del agua de lluvia a través de los pavimentos porosos ayuda a recargar el agua subterránea, lo que contribuye a mantener los niveles adecuados del agua en el subsuelo y promueve la sustentabilidad hídrica.

- Mejoran la calidad del efluente: Los pavimentos permeables actúan como filtros naturales al permitir que el agua de lluvia se filtre a través de ellos, lo que ayuda a retener y eliminar contaminantes presentes en el agua, mejorando así la calidad del efluente que llega a los cuerpos receptores.

Los pavimentos permeables están compuestos de 5 partes como se muestran en la Figura 2.

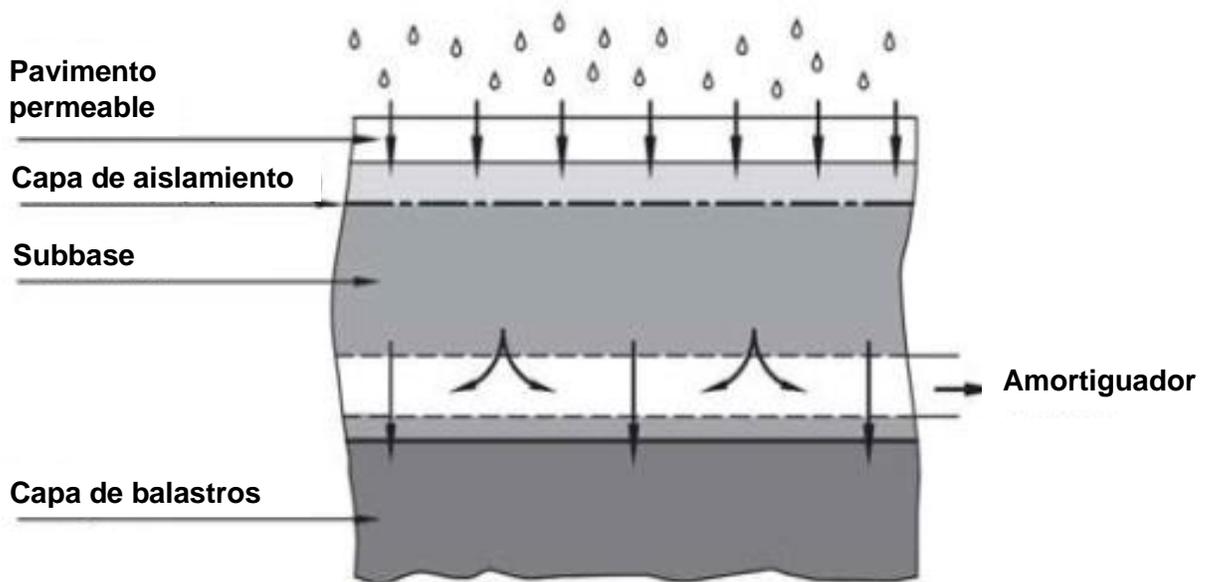


Figura 2. Sección de un pavimento permeable (Xiaoqian, 2020)

**Pavimento permeable:** El espesor debe determinarse de acuerdo con la función de la superficie de la carretera. Debido a que la capa superficial está en contacto directo con el agua de lluvia, etc., es probable que la superficie de la carretera impermeable cause acumulación de agua, por lo que el material seleccionado debe tener cierta permeabilidad al agua.

**Capa de aislamiento de filtro inverso:** La capa de aislamiento anti-filtro generalmente se coloca entre la capa superficial y la capa base, su función es filtrar las partículas y contaminantes más grandes de la capa superficial, para evitar que los espacios en la capa base se bloqueen y afecten la infiltración de agua de lluvia. Los principales materiales utilizados en la capa de aislamiento del filtro de pavimento permeable son arena mediana, arena gruesa o mortero seco de cemento duro.

Amortiguador: El cojín es la capa estructural entre la base del suelo y la base. Cuando la base del suelo del pavimento es permeable es un suelo cohesivo, se debe de proporcionar una capa de amortiguación. Para reducir la penetración de agua de lluvia en la capa base y dañar la capa de balasto. Cuando la base del suelo es arenosa o la subbase es de grava, no se puede proporcionar una capa cojín. La capa de amortiguación generalmente usa arena gruesa, arena mediana y grava de pequeño tamaño.

Subbase: La capa base es la parte que se utiliza para almacenar el agua de lluvia en el pavimento permeable. Como parte importante de la recolección de agua de lluvia, los materiales utilizados deben tener una gran porosidad. Se puede seleccionar la base granular permeable, la base de hormigón permeable y la grava estabilizada con cemento.

Capa de balastro: La capa inferior de la estructura del pavimento permeable, conocida como lecho de la carretera, desempeña un papel crucial en la calidad general de la estructura. El agua de lluvia ingresa a través de la capa superficial y se infiltra en la base del suelo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el agua y la carga del tráfico pueden afectar la estabilidad de la estructura permeable del pavimento. Por lo tanto, al considerar el lecho de la carretera, se deben tomar en cuenta diversos factores, como el tipo de suelo, su permeabilidad y los materiales de construcción, ya que estos elementos pueden verse significativamente afectados por las cargas de agua y el tráfico de vehículos.

### 1.6.2 Cubiertas verdes

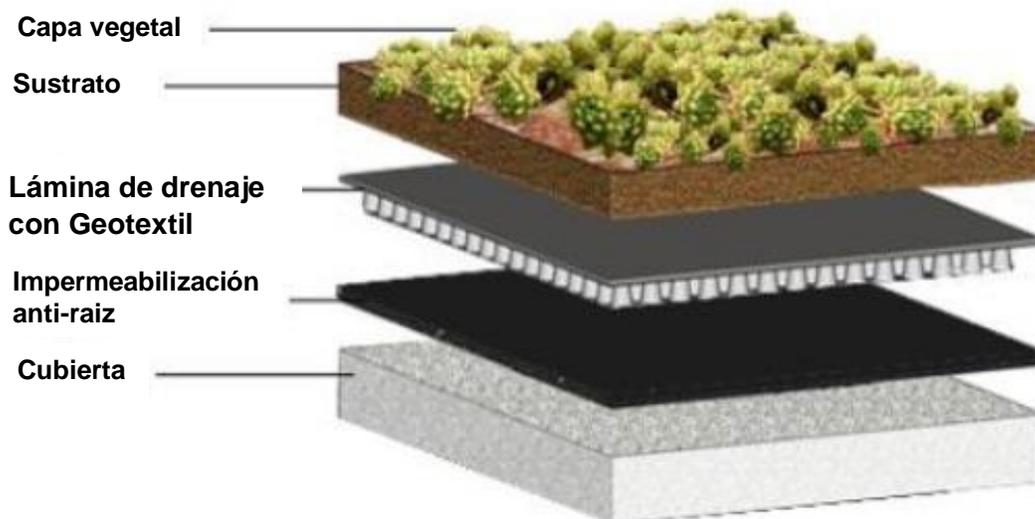
Las cubiertas verdes o techos verdes son sistemas multicapa con cubierta vegetal que recubren tejados y terrazas de todo tipo. Son construidas para retener las aguas pluviales, reduciendo el volumen de esorrentía y la carga de contaminantes disminuyendo el caudal pico. Además, actúan como capa aislante térmico en el edificio y ayudan a compensar el efecto “isla de calor” que se produce en las ciudades (Rodríguez, 2017)

De acuerdo con Rodríguez (2017) las cubiertas verdes se clasifican en tres:

**Extensivas:** Vegetación es baja y ocupa la totalidad de la superficie, pueden ser llana o inclinadas y apenas necesitan mantenimiento. Espesores de 25-125mm, se recomiendan plantas resistentes a sequías (Sedum).

**Intensivas:** Son similares a un jardín convencional con sustrato mayores a 125mm permiten su uso y ser equipadas con mobiliario. Requieren mayor mantenimiento.

**Biodiversas:** Es similar en composición a una cubierta extensiva, pero se diseña específicamente para crear un entorno que pueda ser colonizado naturalmente por plantas, insectos y pájaros, creando un hábitat similar al que había antes del desarrollo urbano.



*Figura 3. Partes de una cubierta verde (Rodríguez, 2017)*

### 1.6.3 Pozos de infiltración y zanjas de infiltración

De acuerdo con MINVU-DICTUC (1996) los pozos de infiltración son excavaciones cilíndricas de profundidad variable que permiten la infiltración directa del agua de lluvia en el suelo en espacios reducidos. Estos pozos pueden estar llenos o no de material y son útiles en zonas urbanizadas con suelo poco permeable o superficies de terreno impermeables con capacidades importantes de infiltración en capas profundas del suelo.

El funcionamiento hidráulico de estas obras puede resumirse en tres etapas: la primera es el ingreso del agua proveniente de la tormenta al pozo de infiltración, la que se puede efectuar a través de la superficie o desde redes de conductos. Una vez ingresa al pozo, el agua se almacena temporalmente dependiendo de las características de la tormenta y del suelo, para posteriormente ser evacuada mediante la infiltración.

Los objetivos básicos de los pozos de infiltración son:

- Disminuyen el caudal máximo
- Disminuyen el volumen escurrido y permiten otros usos alternativos
- Recargan la napa de agua subterránea

Las zanjas de infiltración son construcciones largas y poco profundas, con una profundidad recomendada entre 1 y 3 metros, que reciben agua a lo largo de su longitud, interceptando el flujo superficial de una tormenta y evacuándolo mediante infiltración al subsuelo. En caso de que la zanja no pueda recibir agua en toda su longitud, es posible alimentarla desde uno de los extremos utilizando una tubería perforada en la parte superior y se recomienda contar con cámaras a la entrada y la salida. En este caso, la zanja puede ser cubierta para utilizar la superficie para otros fines, como veredas, paseos o estacionamientos. El funcionamiento hidráulico de estas obras se puede resumir en tres etapas: el ingreso del agua de tormenta a la zanja, el almacenamiento temporal del agua en la zanja y la evacuación a través del suelo mediante la infiltración. Se recomienda el uso de zanjas de infiltración en áreas residenciales donde el agua de lluvia tiene una baja concentración de sedimentos y aceite. Aunque son los más susceptibles a la acumulación de sedimentos las zanjas de infiltración son más fáciles de mantener que otras obras de infiltración debido a su accesibilidad, siempre y cuando no estén cubiertas por veredas o calles como se menciona en MINVU-DICTUC (1996).

Los cinco objetivos básicos de las zanjas de infiltración son:

- Disminuir el caudal máximo
- Disminuyen el volumen escurrido

- Recargan el agua subterránea
- Mejoran la calidad del efluente

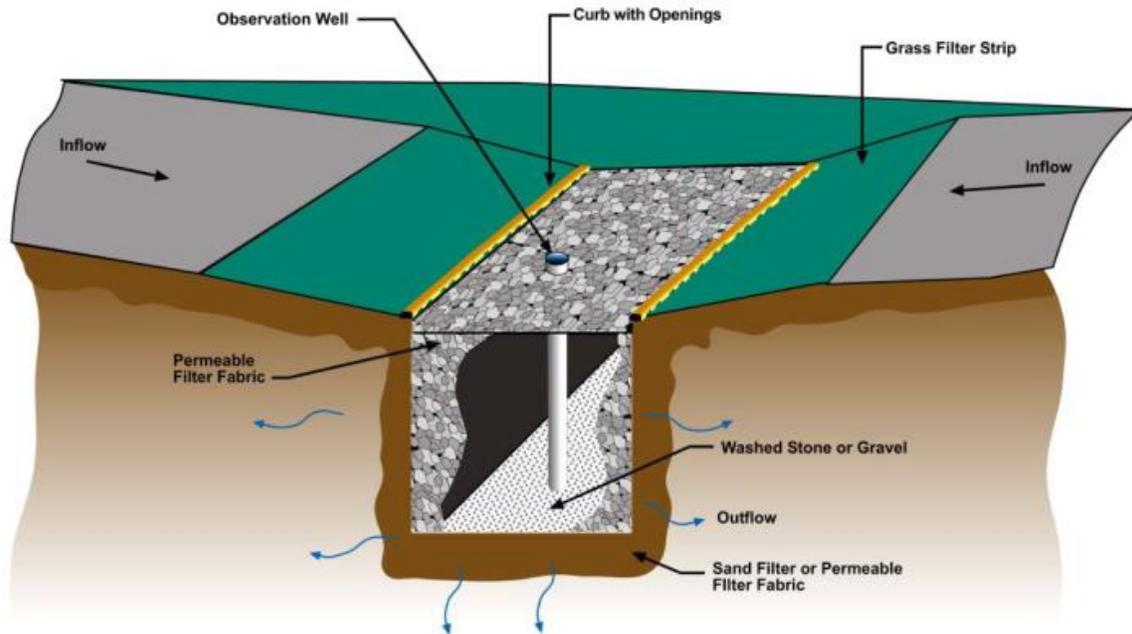


Figura 4. Zanjias de infiltración (MINVU-DICTUC, 1996)

#### 1.6.4 Estanques de infiltración

De acuerdo con MINVU-DICTUC (1996), los estanques de infiltración son pequeñas piscinas poco profundas ubicadas en los suelos permeables. Se aprovechan de depresiones naturales en áreas abiertas o recreativas o se excavan en terrenos, especialmente en jardines y espacios verdes. Su función es almacenar temporalmente el agua de las tormentas hasta que se infiltra a través del fondo y los lados del estanque. Estas estructuras son comúnmente utilizadas en terrenos donde el nivel de agua subterránea se encuentra profundamente bajo el fondo del estanque para asegurar que el agua se filtre a través del suelo antes de llegar a la capa freática. Además, necesitan tener una permeabilidad adecuada para permitir un rápido vaciado entre las lluvias así evitar daños en la vegetación.

En general, los estanques de infiltración son obras modestas en términos de tamaño y se aprovechan de pequeños espacios disponibles en jardines y lugares públicos o privados. Las alturas de agua almacenadas temporalmente son relativamente

bajas, generalmente entre 5 y 10cm, incluso en condiciones de máxima capacidad. Estos estanques resultan eficientes cuando se implementan en gran número en un área, evitando la necesidad de grandes estanques para infiltrar el agua que escurre desde la extensa zona impermeable. Un ejemplo típico de su aplicación es utilizar los jardines de una institución (casa, edificio, etc.) para infiltrar una parte significativa de las aguas pluviales que provienen de los techos de edificios cercanos (MINVU-DICTUC, 1996).

Los estanques de infiltración pueden lograr cinco objetivos básicos que se persiguen con las técnicas alternativas de drenaje urbano:

- Disminuyen el caudal máximo
- Disminuyen el volumen escurrido
- Permiten otros usos alternativos
- Recargan la napa de agua subterránea
- Mejoran la calidad del efluente



*Figura 5. Estanque de infiltración (MINVU-DICTUC, 1996)*

### 1.6.5 Áreas de biorretención

Son superficies ajardinadas que pueden ubicarse en depresiones sobre el suelo autóctono o en áreas delimitadas con suelo especialmente preparado. Su objetivo principal es el tratamiento de la escorrentía antes de su vertido al medio, a través de un proceso de descontaminación biológica. La eliminación de la contaminación se optimiza mediante la presencia de la vegetación adecuada. Para el adecuado funcionamiento de estas técnicas se precisa de un sistema de pretratamiento, ya sea rejilla o una franja filtrante perimetral (Rodríguez,2017).

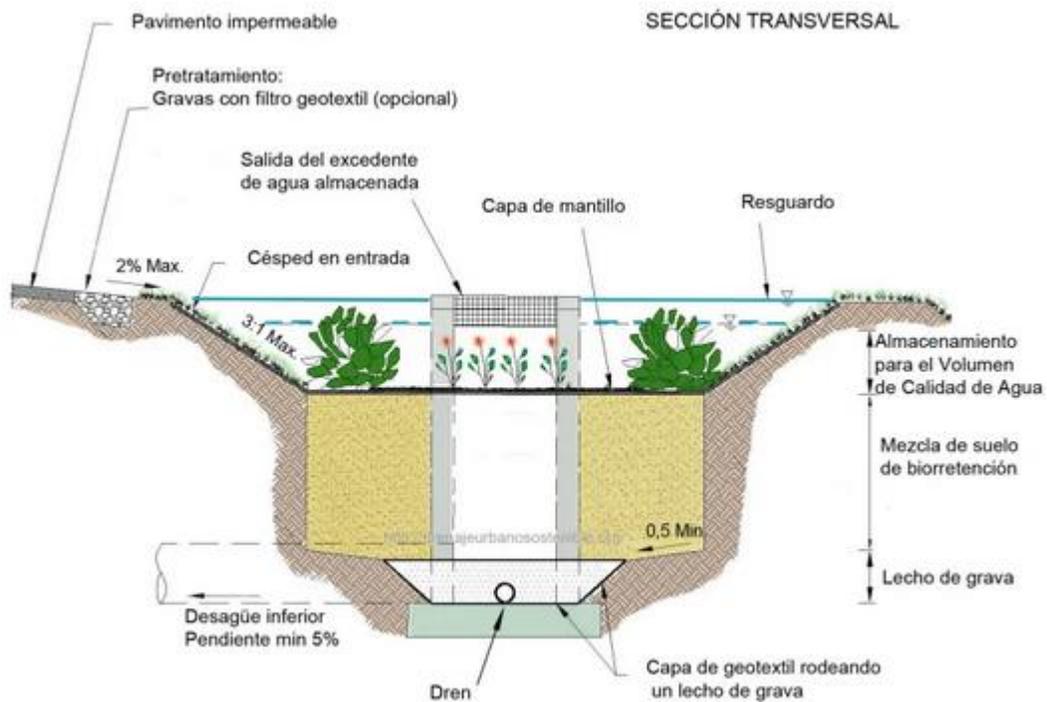


Figura 6. Sección transversal de área de bio-retención (Pérez, 2017)

### 1.6.6 Filtros de arena

En los filtros de arena se dan las siguientes técnicas de retención, filtración y sedimentación. Los filtros almacenan temporalmente el agua y la hacen atravesar por varias capas de arena, mejorando su calidad a la salida, que pueden ir directamente al alcantarillado o infiltrarse en el subsuelo. Los filtros de arena tienen dos cámaras, en la primera se eliminan elementos flotantes y sedimentos pesados, en la segunda se produce la filtración a través de un lecho de arena. En ocasiones pueden tener una tercera cámara, la de descarga (Martín, 2017).

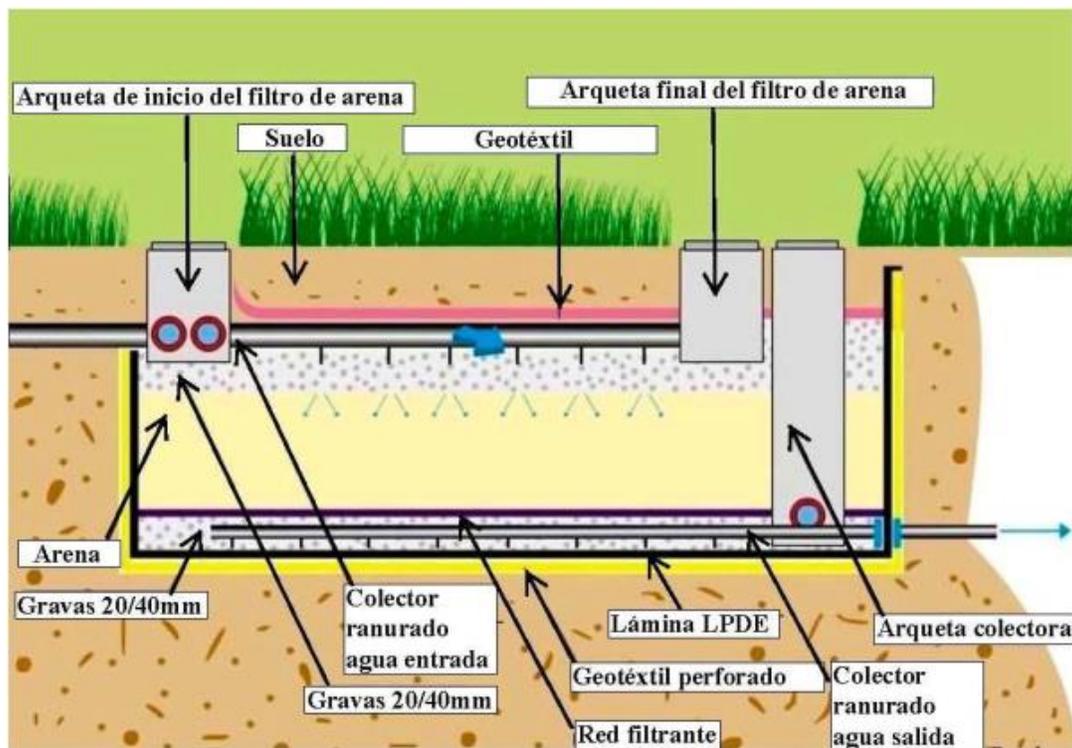


Figura 7. Filtro de arena (Abellán, 2016)

### 1.6.7 Sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL)

Como se menciona en IDESPO (2018) los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) es una técnica que permite aprovechar el agua de lluvia para su uso y consumo humano, y se presenta como una opción completamente diferente a otros sistemas de abastecimiento de agua. Es un sistema sencillo que consta de los mismos componentes que un sistema tradicional de captación de agua superficial para abastecer a una población. Estos componentes son los siguientes:

- **Área de captación:** En un SCALL es la superficie sobre la cual cae la precipitación. Las áreas que se utilizan para este propósito incluyen los techos de las casas, escuelas, bodegas, invernaderos y laderas revestidas o tratadas con materiales que impermeabilizan la superficie. Es crucial que los materiales utilizados en estas superficies no desprendan olores, colores o sustancias que puedan contaminar el agua pluvial recolectada. Se busca asegurar que el agua captada sea lo más limpia y segura posible para su posterior tratamiento y consumo humano.
- **Sistema de conducción:** Se compone de canaletas y tuberías fabricadas con diversos materiales y formas. Su función es transportar el agua de lluvia recolectada desde el área de captación hasta el sistema de almacenamiento a través de bajantes con tubos de PVC.
- **Tubo de desagüe:** Es una parte esencial del sistema que se coloca inmediatamente después del sistema de conducción y antes de los tanques de almacenamiento. Su función principal es permitir que el descarte de las primeras lluvias o, en su efecto, eliminar el agua resultante del lavado del techo y las canaletas. Esto es fundamental para evitar que estas aguas contaminadas lleguen a los tanques de almacenamiento.

Las canaletas se instalan en los bordes inferiores del techo, donde el agua de lluvia tiende a acumularse antes de caer al suelo. De esta manera, las canaletas dirigen el agua captada de forma eficiente hacia los tubos PVC, asegurando que se recolecte y transporte adecuadamente hasta el lugar de almacenamiento. Es importante que este sistema de conducción este bien

diseñado y mantenido para evitar pérdidas de agua y asegurar la efectividad del proceso de captación.

- Estructura de almacenamiento: Son tanques donde se almacena el agua de lluvia captada para ser utilizada para su uso y aprovechamiento.
- Sistema de distribución: El sistema de distribución del agua captada consta de una tubería de PVC que conduce el agua de los tanques de almacenamiento hasta el sitio donde se quiere llevar para su uso.
- Filtración: Antes de la llegada del agua a los tanques de almacenamiento se tienen dos filtros que retienen los sólidos suspendidos, de esta forma el agua el agua llega hasta los tanques se encuentra libre de partículas suspendidas.
- Desinfección: Como sistema de desinfección o purificación se tienen un equipo de luz UV que se encarga de eliminar cualquier microorganismo que se encuentre en el agua y pueda afectar la salud humana.

En conjunto, el SCALL proporciona una manera efectiva y sostenible de aprovechar el recurso hídrico de la lluvia para cubrir las necesidades de agua potable (IDESPO,2018).

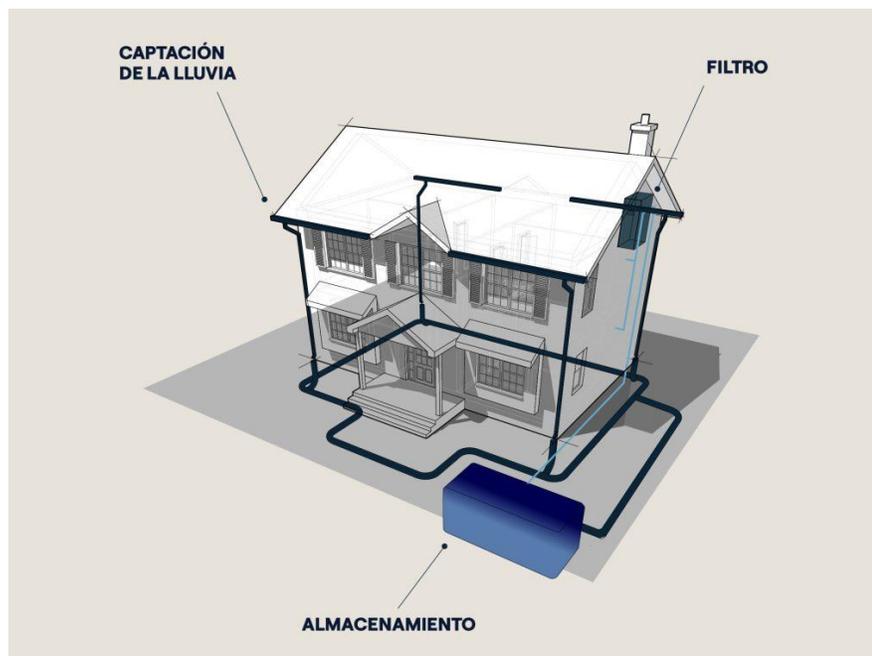


Figura 8.Sistema de Captación de Agua de Lluvia  
Fuente: <https://econova-institute.com/sistema-captacion-pluvial/>

### 1.6.8 Drenes filtrantes o drenes franceses

Son zanjas poco profundas revestidas con geotextil y rellenas con material filtrante, ya sea granular o sintético. En estas zanjas, no hay presencia de vegetación. Su propósito es capturar el agua que fluye desde superficies impermeables adyacentes y transportarla hacia abajo, permitiendo así la filtración y laminación de estos volúmenes de escorrentía. Estas zanjas tienen una composición similar a las zanjas de infiltración, pero se diferencian en su función principal, que es el transporte de agua capturada en lugar de la infiltración. Es común que estas zanjas incorporen una tubería de drenaje para facilitar la función de transporte de agua (Rodríguez,2017).

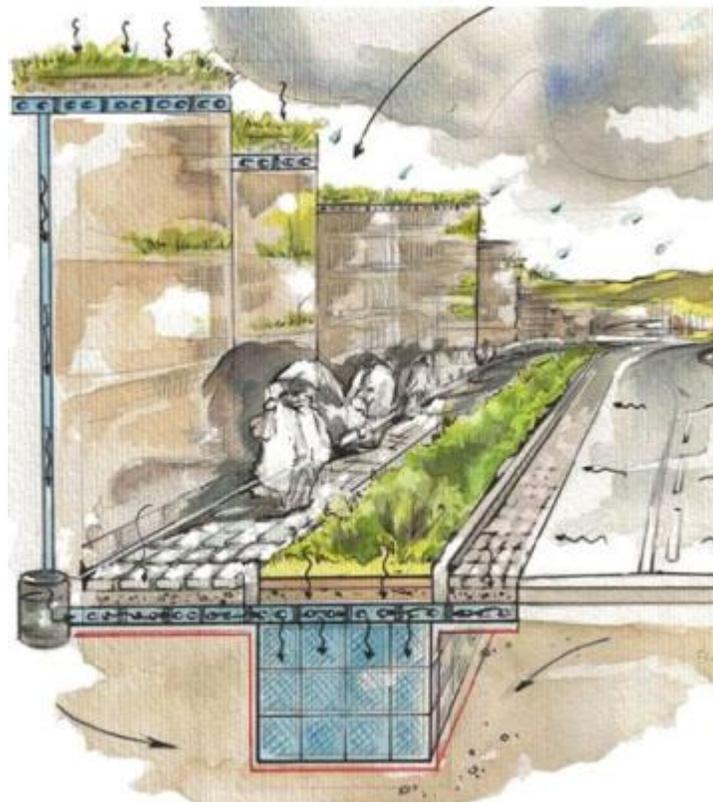
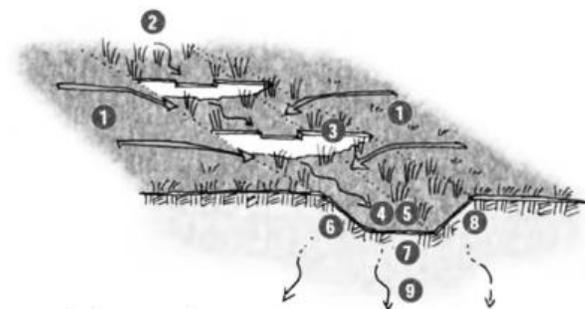


Figura 9. Drenes filtrantes. (Rodríguez,2017)

### 1.6.8.1 Cunetas verdes

Las cunetas verdes son estructuras lineales en forma de canales abiertos, poco profundos y densamente vegetados, con una base ancha (mayor a 0.5 metros) taludes con poca pendiente (menor a 1:3). Estos sistemas de drenaje ofrecen ventajas significativas debido a su óptima relación entre el costo y capacidad, y también presentan oportunidades para múltiples usos, como recreación y contribuciones estéticas al paisaje. Uno de los objetivos principales de las cunetas verdes es capturar, laminar, transportar y tratar superficialmente el agua de escorrentía. Están diseñadas con una suave inclinación que permite que la escorrentía sea filtrada por la vegetación plantada en el fondo y los laterales del canal. Además, estas cunetas pueden facilitar la infiltración hacia capas inferiores, a excepción de si se encuentran sobre zonas de protección de aguas subterráneas, en cuyo caso se sellarán en su zona inferior (Rodríguez,2017).

Las cunetas verdes proporcionan una solución efectiva para gestionar las aguas pluviales, ayudando a reducir el flujo de escorrentía y mejorar la calidad del agua al permitir que la vegetación actúe como filtro natural. Además, su diseño amigable con el entorno y su costo razonable las convierten en una opción alternativa para proyectos de drenaje sostenible (Rodríguez,2017).



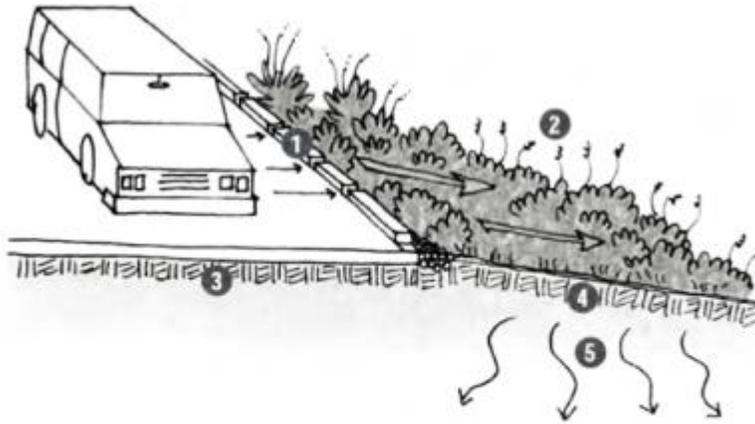
1. Escorrentía.
2. Pendiente max. 5% .
3. Presas intermedias recomendadas.
4. Hierba de 15 cm.
5. Altura del agua aprox. 2/3 de la hierba
6. Forma trapezoidal del canal
7. Ancho max. 3m.
8. Pendiente lateral max. 3:1
9. Infiltración

Figura 10. Cunetas verdes. (Rodríguez, 2017)

#### 1.6.8.2 Franjas filtrantes

Las franjas filtrantes son áreas planas que están cubiertas de césped denso u otra cobertura permeable, como gravilla o piedrecilla de playa, que permite la infiltración del agua. Su objetivo principal es favorecer la infiltración de manera uniforme a lo largo de toda la superficie. Estas franjas están diseñadas para que el agua escurra como flujo superficial continuo desde un extremo hasta el extremo más bajo, en el lugar de concentrarse como sucede en las canalizaciones, como zanjas, soleras o canaletas. En caso de que se produzca un flujo concentrado, este debe ser distribuido uniformemente a lo ancho de la Franja Filtrante mediante una franja de pavimento poroso u otra estructura que asegure un flujo en forma de lámina. Además, estas franjas pueden combinar áreas verdes con veredas, estacionamientos o bermas adyacentes a zanjas de evacuación. Pueden incluir arbustos y árboles que absorben nutrientes y proporcionan sombra. En climas semiáridos, el riego es fundamental para mantener un césped denso y saludable cercanos (MINVU-DICTUC,1996).

Las Franjas Filtrantes se utilizan en áreas comerciales y residenciales, integrándolas en la planificación del drenaje de terrenos, calles y barrios para desconectar las áreas impermeables. Es importante limitar el tamaño del área contribuyente y, por lo tanto, el volumen asociado para garantizar que el flujo escurra como lámina uniforme y de poca altura sobre la superficie de la franja. El agua puede ser dirigida hacia las Franjas Filtrantes desde superficies impermeables, como estacionamientos, calles, pasajes, veredas o techos de edificios, mediante elementos de distribución con un umbral horizontal en el extremo más alto del plano (MINVU-DICTUC,1996).



1. Bordillos discontinuos
2. Vegetación densa
3. Ancho de pavimento max 20m.
4. Ancho de la franja min. 5m.
5. Infiltración

Figura 11. Franjas filtrantes (MINVU-DICTUC, 1996).

### 1.6.9 Depósitos de detención

Son áreas deprimidas con superficies permeables que actúan como embalses superficiales para acumular y retener agua de lluvia proveniente de las cuencas de tamaño considerable. Con el tiempo, esta agua se filtra y se absorbe en el suelo. La forma de los depósitos es irregular, ya que se adaptan a la topografía del área en la que se encuentran. Se requiere que los taludes laterales sean suaves y estén cubiertos de vegetación. Los depósitos de infiltración están diseñados para contener mayores volúmenes de agua en comparación con pozos y zanjas de infiltración, y funcionan con el mismo principio de control en origen para gestionar cuencas de mayor tamaño (Castro, Rodríguez & Sañudo,2012).



*Figura 12. Estanques de detención a gran escala.*

#### 1.6.10 Estanque de detención

Los estanques de detención son diseñados de tal manera que se vacían por completo en un periodo relativamente corto después de una tormenta. Por lo tanto, la mayor parte del tiempo están vacíos o sin agua. Estos estanques son una adaptación de los embalses utilizados para controlar las crecidas, pero incorporan elementos que los hacen adecuados para su uso en áreas urbanas. Son considerados “secos”, ya que en general no mantienen una zona permanente llena de agua, y si tienen una es de tamaño reducido. El principal propósito de estos estanques es reducir los flujos máximos de agua que se dirigen aguas abajo. Aunque pueden eventualmente acumular cantidades significativas de sedimentos, se espera que estos sedimentos sean removidos después de asentarse para mantener el volumen de retención planificado. Esto permite que la mayor parte de la superficie del estanque se utilice para otros fines durante el periodo entre tormentas. Además de su función principal, también es crucial atender a objetivos secundarios relacionados con la apariencia paisajística y unos usos públicos en el diseño de estos estanques (MINVU-DICTUC,1996).

Como se menciona en MINVU-DICTUC (1996) estos estanques son abastecidos por aguas pluviales que fluyen desde techos, calles, estacionamiento, áreas residenciales, zonas comerciales e incluso zonas industriales. Pueden ser utilizados individualmente o en combinación con otras estructuras alternativas para el control de aguas pluviales en áreas urbanas. Los cinco objetivos fundamentales propuestos para las estructuras alternativas de drenaje urbano, el comportamiento de los estanques de retención se describe de la siguiente manera:

- Disminuyen el caudal máximo
- Disminuyen el volumen escurrido
- Permiten otros usos alternativos
- Recargan la NAPA de agua subterránea
- Mejoran la calidad del efluente



Figura 13. Estanque de retención en Fort Collins, Colorado, EE. UU. (MINVU-DICTUC, 1996).

#### 1.6.11 Humedales artificiales

Estos dispositivos artificiales son diseñados para almacenar agua de escorrentía y flujos subterráneos. Tienen una profundidad limitada y están caracterizados por una densa vegetación emergente similar a la que se encuentra en pantanos y zonas húmedas. Esta abundante vegetación les permite lograr altos niveles de eliminación de contaminantes como sólidos suspendidos, metales pesados, nitrógeno y coliformes, con tasas que varían entre el 50% y el 90%. Además de su notable eficacia en la mejora de la calidad del agua, estos dispositivos también son valiosos para controlar el volumen de escorrentía (Rodríguez,2017).

De acuerdo con l'Aigua (2021) los elementos esenciales de un humedal artificial incluyen:

- Sustrato o material granular: Este actúa como un sostén para la vegetación, facilitando la fijación de la biopelícula bacteriana, esencial en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes presentes en las aguas a tratar.
- Vegetación: Principalmente compuesta por macrófitas emergente, contribuye a la oxigenación del sustrato a nivel de la rizosfera, la eliminación de nutrientes por absorción/extracción, y al desarrollo de la biopelícula bacteriana.
- Agua a tratar o influente: Circula a través del sustrato y la vegetación.

Los mecanismos subyacentes que permiten a estos sistemas depurar las aguas residuales se basan en los siguientes principios (l'Aigua, 2021):

1. Eliminación de sólidos en suspensión: Gracias a fenómenos de filtración entre el sustrato y las raíces.
2. Eliminación de materia orgánica: A través de la acción de microorganismos, principalmente bacterias, que pueden ser aerobios (con O<sub>2</sub>) o anaerobios (sin O<sub>2</sub>).
3. Eliminación de nitrógeno: Ya sea por la acción directa de las plantas o mediante procesos de nitrificación-desnitrificación llevados a cabo por los mencionados microorganismos.
4. Eliminación de fósforo: Principalmente debido a través de fenómenos de adsorción sobre los componentes de sustrato.
5. Eliminación de patógenos: Lograda a través de la adsorción sobre partículas del sustrato, la toxicidad generada por las raíces de las plantas, y la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

Existen diferentes tipos de humedales artificiales en función del sentido de circulación del flujo de agua:

- Humedales artificiales de flujo libre o superficial: En este tipo, el agua fluye sobre el sustrato de manera continua, promoviendo condiciones aerobias al estar expuesta directamente a la atmósfera. Estos humedales se utilizan para tratar efluentes de tratamientos secundarios y para la creación y restauración de ecosistemas acuáticos.
- Humedales artificiales de flujo superficial: Aquí, el agua circula a través del sustrato. Principalmente empleados en el tratamiento de aguas residuales de poblaciones pequeñas (menos de 2000 habitantes), pueden ser horizontales o verticales según la dirección del flujo.
- Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal: Aquí, el agua fluye horizontalmente de forma continua a través del sustrato. Se favorecen las condiciones anaerobias al mantener el nivel del agua por debajo del sustrato, promoviendo procesos como la desnitrificación.

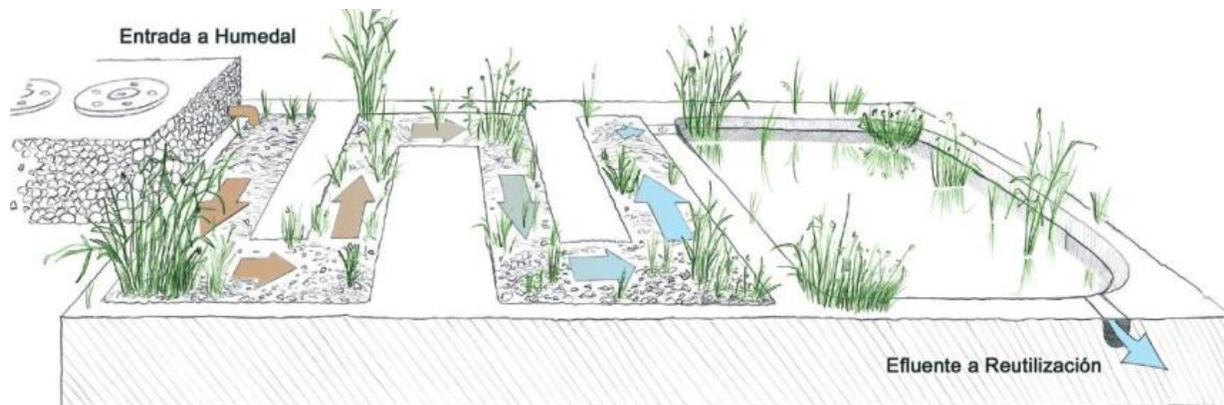


Figura 14. Esquema del sistema híbrido del humedal artificial (Rodríguez, 2017).

## 1.7 Ejemplos de SUDS

### 1.7.1 Ejemplos de SUDS en espacios urbanos

#### 1.7.1.1 Reino Unido

El Reino Unido es uno de los países que más sufre las consecuencias de las inundaciones causadas por el exceso de agua en la superficie, especialmente en las zonas urbanas. La causa principal de estas inundaciones son las lluvias intensas. Para abordar este problema, se han desarrollado los SUDS, que tienen como objetivo controlar la escorrentía urbana y mejorar la calidad del agua. El gobierno británico está constantemente investigando y mejorando los métodos para prevenir y gestionar las inundaciones con el fin de crear un sistema urbano que sea capaz de prevenirlas (Xiaoqian, 2020).

#### 1.7.1.2 Estados Unidos

Estados Unidos reconoce la importancia del agua de lluvia para las ciudades, por lo que cambió el enfoque de simplemente resolver el problema de la descarga de agua de lluvia y formuló políticas y regulaciones para limitar la descarga directa y la pérdida del agua de lluvia, controlar la contaminación del escurrimiento del agua de lluvia y recolectar el agua de lluvia (CONAMA,2018).

Los Estados Unidos legisló por primera en el año 1972 el “Clean Water Act” y “National Pollution Discharge Elimination System”, lo que genera un interés creciente en las “Best Management Practices” (BMP) que es una forma de referirse a los “Sustainable Drainage Systems” (SuDS).

En el año 2010 se publicó el “NYC Green Infrastructure Plan” que es una estrategia basada en infraestructura verde para reducir el volumen de la escorrentía y gestionar el agua de lluvia en su origen mediante los SUDS en New Jersey, EEUU (CONAMA,2018).



*Figura 15.* Ejemplo de SUDS en New Jersey, EEUU

Fuente: Kandyce Perry, New Jersey Future <http://njbikeped.org/wp-content/uploads/Green-Streets.pdf>

### 1.7.1.3 Australia

Se ha desarrollado en Melbourne, Australia, el “Green our city strategic action plan 2017-2021”, un plan estratégico que aborda la importancia de implementar técnicas para la gestión del agua en esta área. Su objetivo principal es promover la sostenibilidad mediante la expansión de áreas verdes en la ciudad, utilizando cubiertas verdes y jardines verticales, dos tipos de SUDS. Se instaló un sistema hidropónico de muro verde a gran escala al aire libre. Este muro verde se encuentra en el complejo artístico y cultural de Melbourne como se puede ver en la Figura 16 y se diseñó para cubrir la fachada exterior de un estacionamiento de varios niveles, con el fin de controlar la entrada de luz y brindar un valor estético adicional al edificio. Además, esta intervención ha incrementado la diversidad de plantas nativas y exóticas, y permite la utilización del agua de lluvia recogida para el riego de estas plantas (Tarazona, Bonilla & Rojas, 2020).



Figura 16. Implementación del Green our city strategic action plan 2017-2021 en el recinto artístico y cultural de Melbourne

Fuente: <https://www.melbourne.vic.gov.au/sitecollectiondocuments/green-our-city-action-plan-2018.pdf>

#### 1.7.1.4 Madrid

La zona verde de la nueva sede del BBVA, de aproximadamente 12,400 m<sup>2</sup>, construida en 2014, cuenta con áreas permeables casi en toda su planta: tierra vegetal en las zonas ajardinadas, paseos de grava y pavimentos de adoquín permeable en el acceso peatonal principal a las oficinas corporativas del BBVA. Su sistema de drenaje lo compone, principalmente drenes filtrantes conectados a depósitos enterrados de infiltración con cajas reticulares; y, de existir rebose vierte a la red de alcantarillado municipal. El agua que no pueda infiltrarse por la zona del pavimento permeable discurre por celdas reticulares, que dirigen la escorrentía hacia dichos depósitos de infiltración. Con base en la modelización numérica del comportamiento del sistema de drenaje para un año tipo, se estima que la incorporación de SUDS para la gestión de las aguas de lluvia supone una reducción del 83% en el volumen anual que es vertido al sistema de saneamiento, respecto a

la opción convencional de captar y dirigir rápidamente la escorrentía generada hacia los colectores (Peris García y Perales Momparler, 2016)



*Figura 17. Zona verde de la nueva sede de BBVA en Madrid (Peris García y Perales Momparler, 2016)*

También en Madrid España, se llevó a cabo la construcción del Parque Gomeznarro, debido a las constantes precipitaciones propias del clima en la zona y las pronunciadas pendientes presentes en el parque, que estaban causando erosiones en su interior. Además, estas pendientes en dirección a las viviendas adyacentes generaban acumulación de agua en las calles y áreas de acceso a las viviendas. Se optó por reemplazar el pavimento impermeable existente por un pavimento permeable compuesto por celdas de drenaje de polipropileno (CONAMA, 2018).

Aprovechando la topografía del lugar, se crearon áreas de captación en las zonas más bajas, donde se instalaron cajas modulares de polipropileno que actuaban como depósitos de infiltración. Estas cajas estaban conectadas al sistema de alcantarillado pluvial para la descarga del agua. Además, se realizó una revegetación completa de todo el parque. Se pudo observar que los procesos de erosión causados por el flujo de agua habían desaparecido. Ya no se producían acumulaciones de agua en las áreas de acceso a las viviendas, se redujo la temperatura ambiental y se logró una integración paisajística y medioambiental en la localidad (CONAMA,2018).



Figura 18. Instalación de celdas de drenaje bajo pavimento permeable en el parque Gomeznarro (CONAMA, 2018)

#### 1.7.1.5 Japón

En Tokio, Japón, se construyó el proyecto G-Cans, también conocido como el megaproyecto del Gran Canal Subterráneo, durante los años 1992-2009. Debido a la ubicación de la ciudad en una zona tropical, Tokio experimenta precipitaciones mensuales promedio de 1533mm, con una alta intensidad. La ciudad es vulnerable a fuertes lluvias y desastres naturales con frecuencia. Para abordar esta problemática, se llevó a cabo el proyecto G-Cans (Tarazona *et al.*, 2020).

El proyecto G-Cans consiste en una serie de canalizaciones que incluyen un tanque principal de 78 metros de profundidad, cinco silos interconectados a través de túneles con una longitud total de 6.4 km, y 59 columnas conectadas a bombas de 10MW capaces de bombear 200 toneladas de agua hacia el río Edogawa. El objetivo principal de este proyecto fue prevenir inundaciones de gran escala que ocurrían como resultado de las fuertes lluvias y los desastres naturales frecuentes en la región. El sistema funciona recolectando el agua de escorrentía a través de pequeños pozos y canalizándola subterráneamente a través de los grandes silos y túneles. Estos espacios subterráneos tienen capacidad para recibir grandes volúmenes de agua y cuentan con una cisterna reguladora de presión que ralentiza el flujo antes de descargarlo al río designado para tal fin. Esta infraestructura ha logrado reducir hasta en un 90% los daños causados por inundaciones (Tarazona *et al.*, 2020).

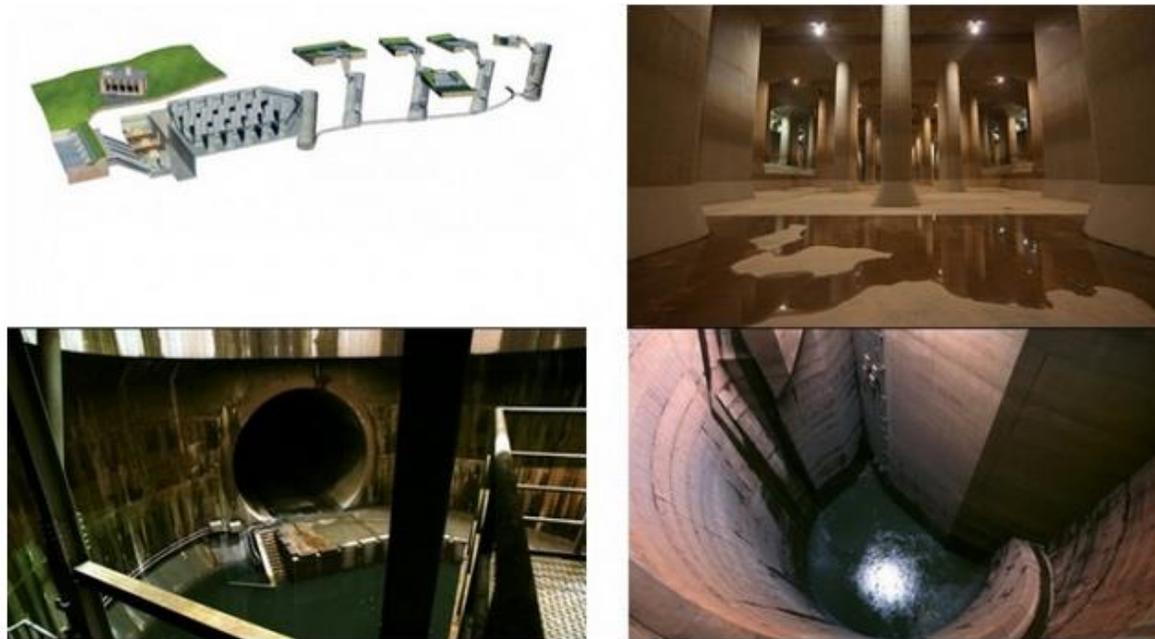


Figura 19. Proyecto G-Cans, alcantarillas en Tokio (Iagua, 2015)

## 1.7.2 Ejemplos de SUDS en industrias

### 1.7.2.1 Parque comercial Oleiros (La Coruña, España)

Es un proyecto para la infiltración de aguas pluviales tiene 3 depósitos de infiltración realizado en un edificio comercial en Oleiros- La Coruña. Tiene como objetivo gestionar las aguas pluviales para una superficie de escorrentía total de 6000m<sup>2</sup>, se conecta la cubierta de un edificio comercial y su estacionamiento anexo con varios depósitos de infiltración con bloques ecológicos para la infiltración de agua de lluvia (CONAMA,2018).

Los bloques filtrantes son los idóneos porque permite el tránsito de vehículos de hasta 40T en las zonas donde están instalados los depósitos y la elevada capacidad de almacenaje de cada estructura hará posible que no quede agua retenida en la superficie durante los episodios de lluvia, contribuyendo a su vez a la recarga de las masas de agua del subsuelo a medida que se produce la infiltración en el terreno y reduciendo el exceso de caudal en el sistema de alcantarillado (CONAMA,2018).



*Figura 20. Parque comercial Oleiros (La Coruña, España).*

Fuente: <https://drenajesostenible.com/wp-content/uploads/2020/01/Parking-Carrefour-oleiros.pdf>

### 1.7.2.2 Nave industrial (Daganzo de Arriba, Madrid)

En Daganzo de Arriba, Madrid se construyó un depósito de infiltración en una nave industrial en el año 2021. Se diseñó para la retención e infiltración “in situ” del agua de lluvia procedente de parte de la cubierta de una nave industrial de 15,000 m<sup>2</sup>, mediante la instalación de un depósito de laminación e infiltración de 135m<sup>2</sup> situado bajo la zona ajardinada de la parcela (SUDS, 2021).



Figura 21. Nave industrial con SUDS en Daganzo de Arriba, Madrid.

Fuente: <https://drenajesostenible.com/proyectos/deposito-de-infiltracion-en-nave-industrial-daganzo/>

### 1.7.2.3 Nave industrial Carrefour (Azuqueca de Henares)

Esta nave industrial utiliza el sistema Stormtech, se compone de cámaras o bóvedas de varias dimensiones, SC-160, SC-310, DC-780, MC-3500 y MC4500, para construir depósitos modulares y proveer espacio para el almacenamiento de las aguas pluviales bajo el suelo urbano (DRENATURA,2019).

La nave industrial cuenta con una superficie de 98,757 metros cuadrados, cuenta con un total de 196 muelles de carga, 659 plazas de aparcamiento y una altura libre de 12.5 metros. Posee una cubierta tipo deck que ofrece una solución innovadora en el drenaje y recogida del agua de lluvia en una parcela de estas dimensiones (DRENATURA,2019).

Infiltra el 95% de todas las precipitaciones anuales. Provee el almacenamiento de 3,800 m<sup>3</sup> de aguas pluviales bajo playas y viales la nave, tratamiento aguas cubiertas y viales (DRENATURA,2019).



Figura 22. Sistema Stormtech de la nave industrial Carrefour (DRENATURA,2019).



Figura 23. Nave industrial Carrefour en Azuqueca de Henares (El mercantil 2021).

#### 1.7.2.4 Planta Praxair, Vallecas

La planta Praxair de Gases Industriales contiene sistemas de infiltración completa para evitar conexiones pluviales a la red del canal (DRENATURA, 2017).



Figura 24. La planta Praxair de Gases Industriales en Vallecas (DRENATURA,2017).

### 1.7.2.5 Industria alimenticia en San Luis Potosí

Diseño e implementación de humedales de tratamiento para los efluentes de una industria alimentaria (Villanueva, 2022).



Figura 25. Implementación de humedal en industria alimentaria

## CAPÍTULO 2. Delimitación geográfica, aspectos físicos y crecimiento histórico de la zona industrial de San Luis potosí.

### 2.1 Ubicación de la zona industrial

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2007, la zona industrial se encuentra enclavada dentro del municipio de San Luis Potosí, en el estado homónimo. Precisamente, se localiza a una distancia de 18.83 kilómetros al sur del centro geográfico del municipio de San Luis Potosí y a 5.64 kilómetros al suroeste del núcleo urbano de la localidad de San Luis Potosí.

La delimitación del polígono correspondiente a la zona industrial se llevó a cabo con base en el Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de San Luis Potosí (PDUCP, 2021). Este polígono corresponde al distrito 6 de San Luis Potosí, como se ilustra en la figura 25.

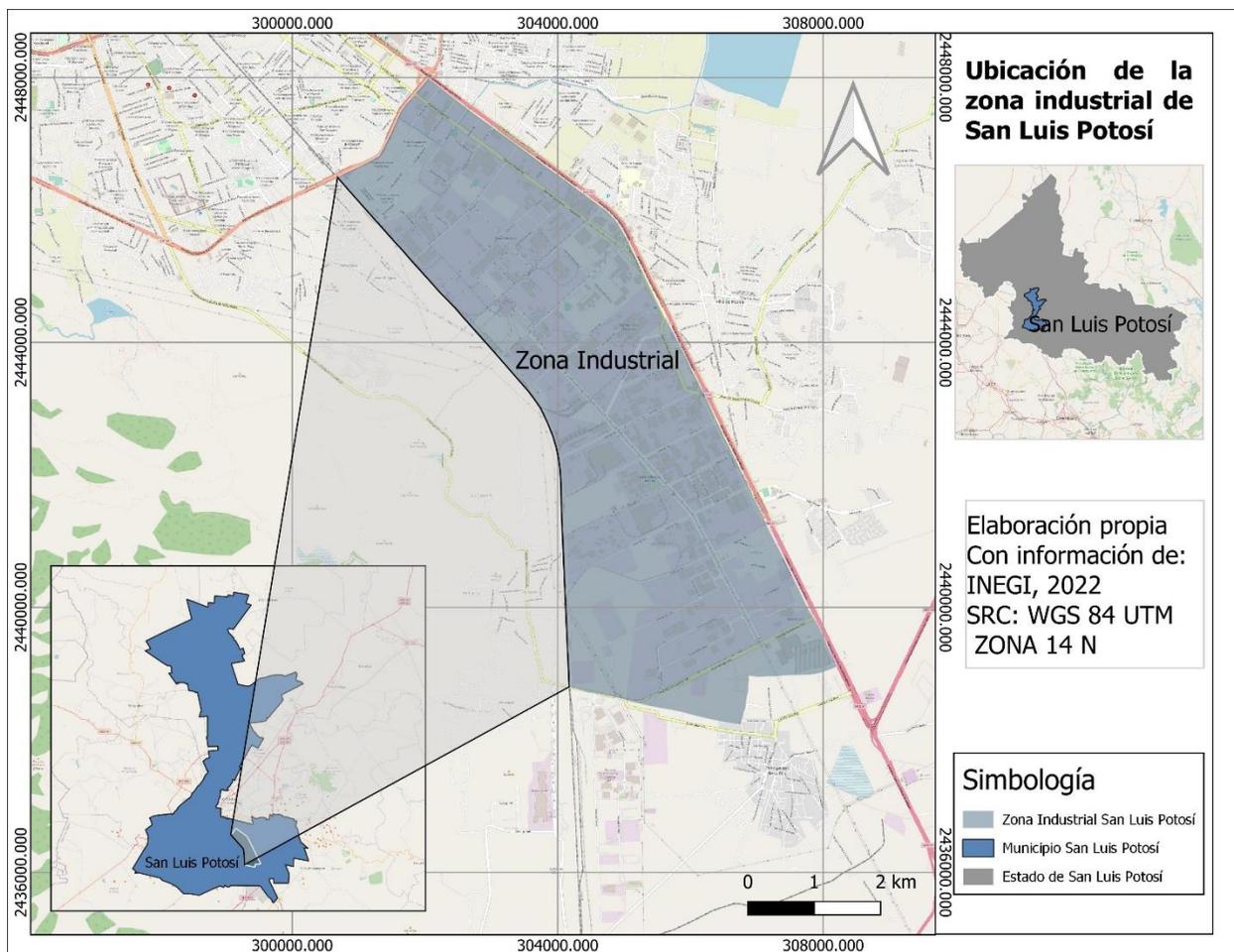


Figura 26. Ubicación de la Zona Industrial en San Luis Potosí México

## 2.2 Crecimiento de la zona industrial y cambio de uso de suelo

Conforme a los datos proporcionados por IMPLAN (2021), se han definido cuatro categorías principales de uso de suelo y vegetación. El 8.34% del territorio se destina a uso agrícola, mientras que los suelos con cuerpos de agua representan un 0.14%. La cobertura vegetal abarca el 1.29% de la superficie, mientras que los asentamientos humanos ocupan la mayor proporción, con un 90.23% del territorio.

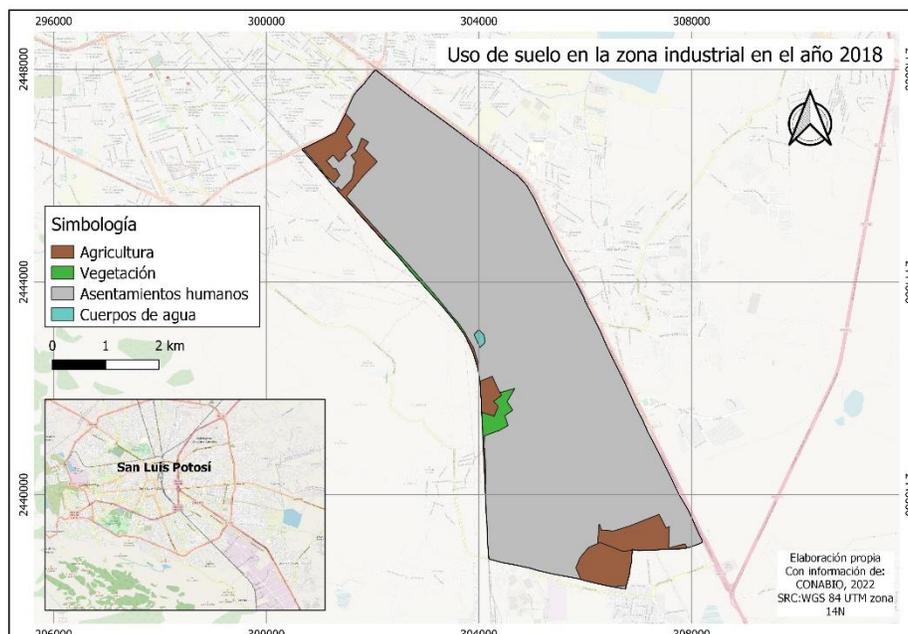


Figura 27. Mapa de uso de suelo en la zona industrial de San Luis Potosí año 2018 (Elaboración propia con información de CONABIO, 2023)

Crecimiento de la zona industrial de San Luis Potosí con el cambio de uso de suelo en los años 1990,2011 y 2018.

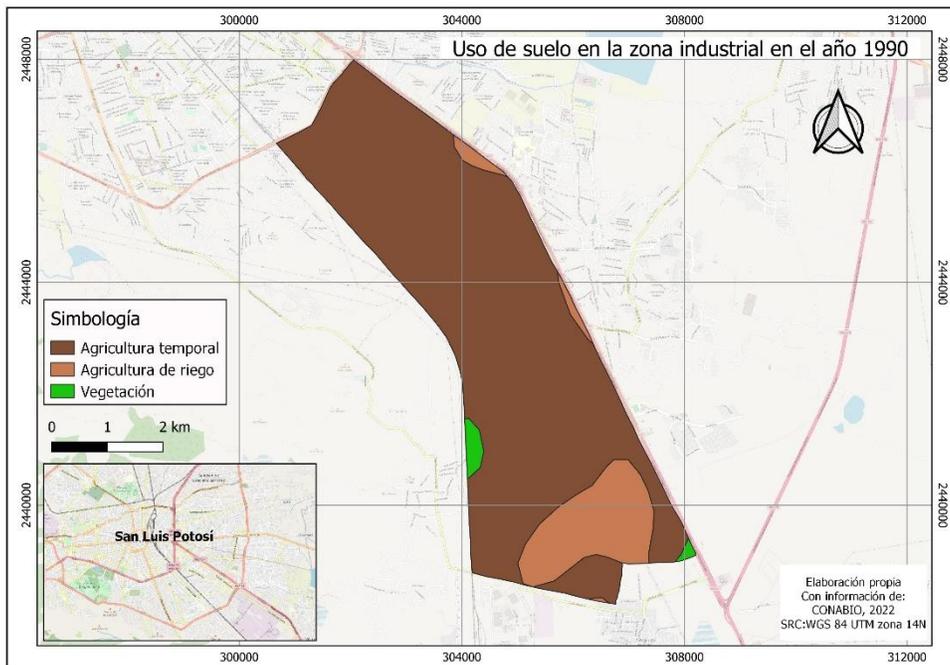


Figura 28. Mapa de uso de suelo en la zona industrial de San Luis Potosí año 1990 (Elaboración propia con información de CONABIO, 2023)

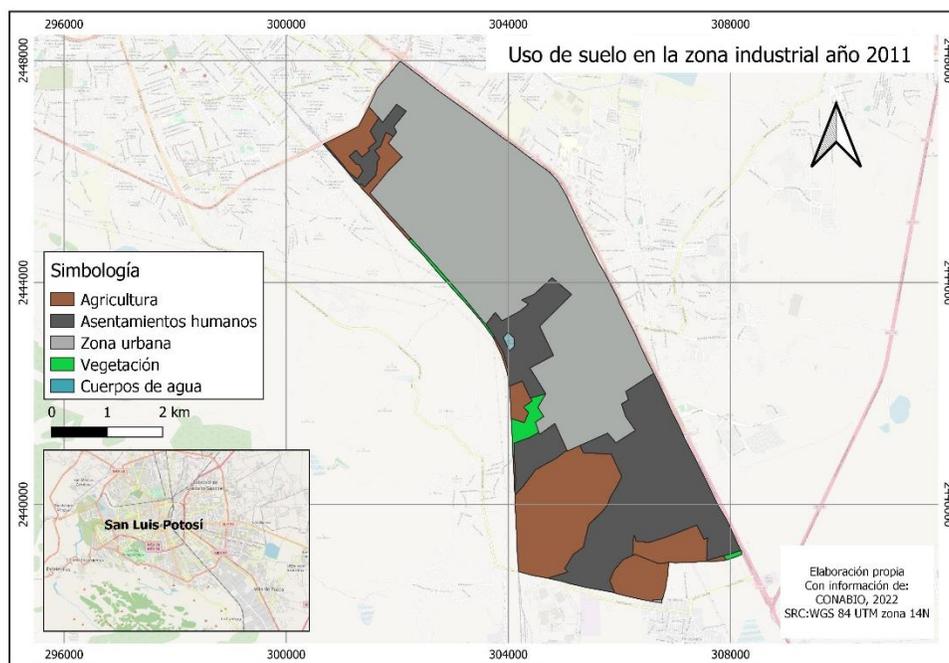


Figura 30. Mapa de uso de suelo en la zona industrial de San Luis Potosí año 2011 (Elaboración propia con información de CONABIO, 2023)

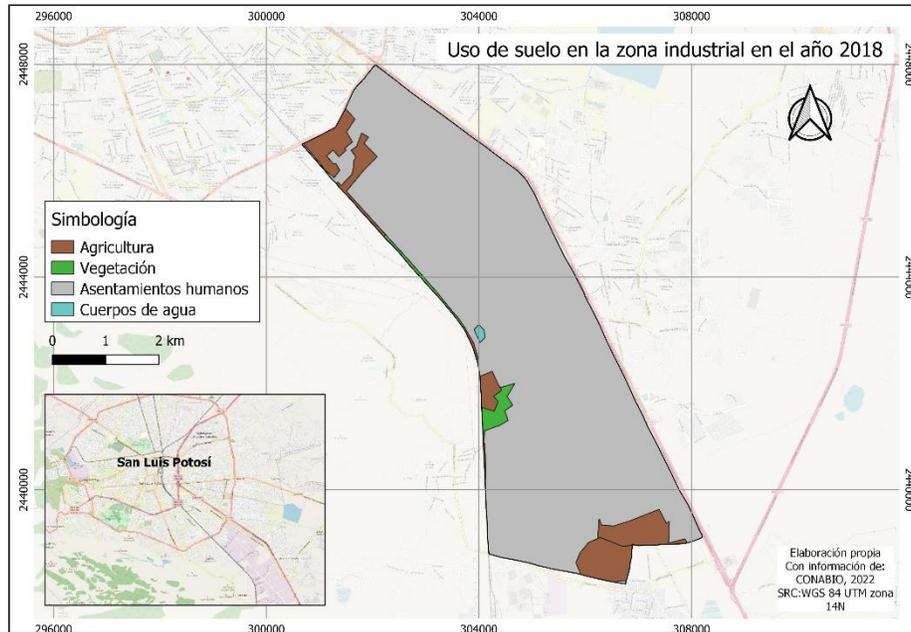


Figura 31. Mapa de uso de suelo en la zona industrial de San Luis Potosí año 2018 (Elaboración propia con información de CONABIO, 2023)

En el año 1990 (Figura 27) el 98.87% de la zona industrial era agricultura y no había áreas urbanizadas en la zona, en el año 2018 los asentamientos humanos predominaron en la zona aumentando en un 90.23% del área total.

La superficie urbana se multiplicó con rapidez, a este fenómeno contribuyó en el éxito de la diversificación e intensificación industrial que experimentó la ciudad, así como la implantación durante las dos últimas décadas de diversas empresas de servicios. A esta expansión contribuyó el cambio de su patrón de crecimiento radial concéntrico a polinuclear, debido principalmente a la decisión que se tomó de acondicionar las zonas industriales para fomentar la llegada de inversión al sector (Contreras y Galindo, 2008).

## 2.3 Aspectos físicos

### 2.3.1 Orografía y topografía

De acuerdo con el IMPLAN (2021) el área urbana de San Luis Potosí se encuentra en una región geológicamente activa desde el periodo del oligoceno, donde han ocurrido distintos fenómenos geológicos como arcos de islas, cuencas sedimentarias, plataformas y arcos magmáticos. En términos de su conformación física, se caracteriza por la presencia de estructuras de origen tectónico, especialmente plegamientos del periodo cretácico, así como fallas y formaciones volcánicas del periodo terciario.

En términos de altitud, las elevaciones promedio de estas formas de relieve varían desde los 1500 metros sobre el nivel del mar hasta 2530 metros sobre el nivel del mar, siendo este último valor correspondiente a la parte más alta de la Sierra de San Miguelito, ubicada al suroeste del municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021).

### 2.3.2 Geología

El municipio de San Luis Potosí se encuentra dentro del Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP), específicamente en el Valle de San Luis Potosí, ubicado en la parte sur de dicho municipio. Este valle representa una depresión en la parte norte de una fosa tectónica conocida como Graben de Villa de Reyes, que contiene una acumulación significativa de depósitos aluviales formados por materiales volcánicos reworked y sedimentos continentales en su mayoría (Barbosa, 2018).

Hacia el norte y noroeste del municipio de San Luis Potosí, se pueden encontrar afloramientos de rocas volcánicas, en su mayoría de composición riolítica a riodalítica. En contraste, en las zonas hacia el este y noreste, que pertenecen a los municipios conurbados de Soledad de Graciano Sánchez y Cerro de San Pedro, en las sierras de San Pedro y de Álvarez, se pueden observar calizas, calizas arcillosas y lutitas del Cretácico Superior (Barbosa, 2018).

### 2.3.3 Edafología

En México existe una gran diversidad edáfica, representada por 25 grupos de suelo. Sin embargo, los tipos de suelo cercanos a la zona de estudios son los que se muestran a continuación (INEGI, 2007).

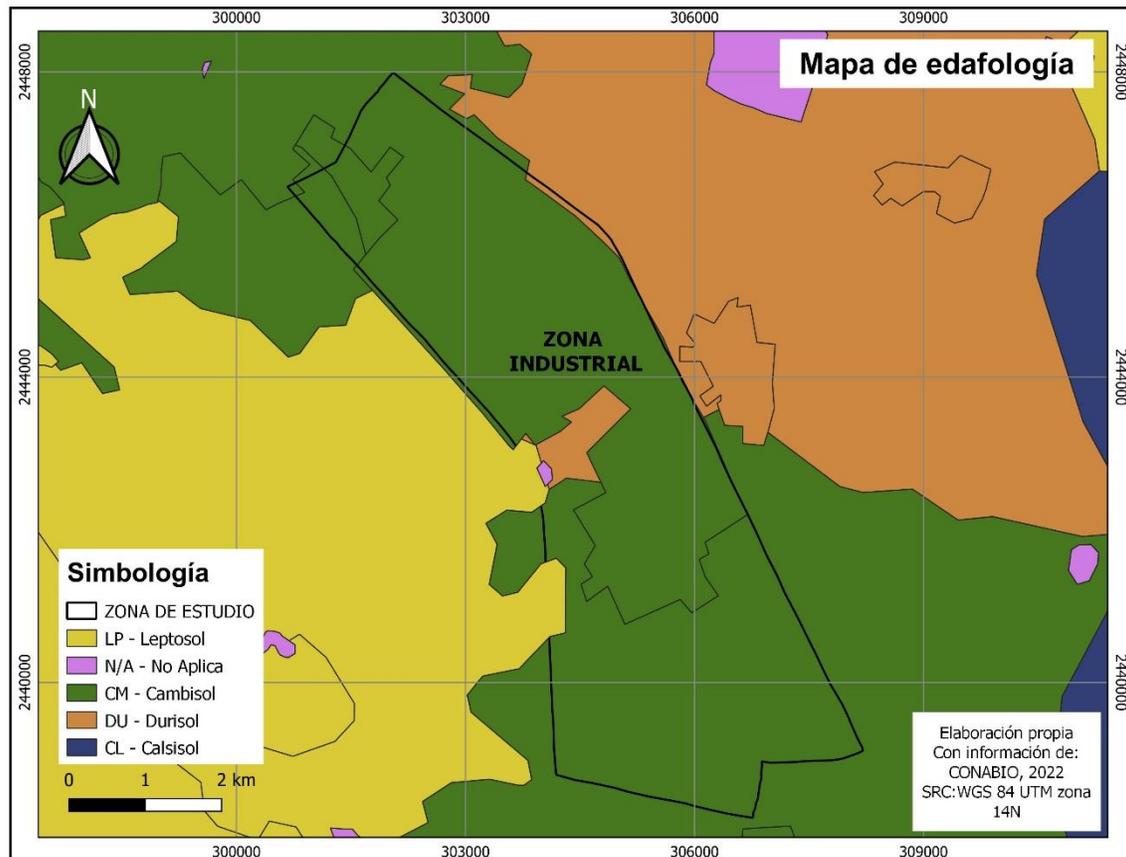


Figura 32. Mapa de edafología en la zona industrial de San Luis Potosí, Elaboración propia con información del INEGI (2007)

#### Leptosol

Este tipo de suelo son someros y pedregosos que pueden tener roca continua en o muy cerca de la superficie. Se encuentran en todos los tipos de climas (secos, templados, húmedos) y son particularmente comunes en las zonas montañosas y en planicies calizas superficiales. El calcio que contienen puede inmovilizar los minerales, lo cual, junto con su poca profundidad y alta pedregosidad, limita su uso agrícola si no se utilizan las técnicas apropiadas, por lo que debe preferirse mantenerlos con su vegetación original (INEGI, 2007).

## **Cambisol**

Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se puede encontrar cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo de una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. También pertenecen a unos suelos muy delgados, son muy abundantes, se destinan a muchos usos y sus rendimientos son variables pues dependen del clima en donde se encuentre el suelo. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión (INEGI, 2007).

## **Durisol**

La mayoría de los suelos durisoles son suelos bien drenados, de textura media a gruesa. Tienen horizonte Dúrico o Petrodúrico dentro de los 100 cm del perfil edáfico medio desde la superficie del mismo. La capacidad de retención de agua de los Durisoles con un horizonte Petrodúrico depende principalmente de la profundidad y composición del suelo por debajo de ese “duripan” (INEGI, 2007).

## **Calcisol**

Son suelos con acumulación sustancial de material calcáreo. Están muy extendidos en ambientes áridos y semiáridos. Proviene principalmente de depósitos aluviales, coluviales y eólicos de material meteorizado (INEGI, 2007).

### 2.3.4 Hidrología

#### 2.3.4.1 Hidrología superficial

La región hidrológica 37, conocida como El Salado (RH-37), es una de las vertientes más significativas de México debido a su gran extensión. En el territorio potosino, abarca aproximadamente el 54.2% de la superficie total del estado. Limita al sureste con la Región Hidrológica 26, Pánuco. La región hidrológica 26, también conocida como Pánuco (RH-26), se divide en dos subregiones: Alto Pánuco y Bajo Pánuco. Esta región abarca aproximadamente el 45.6% del territorio del estado (Estrada, 2013).

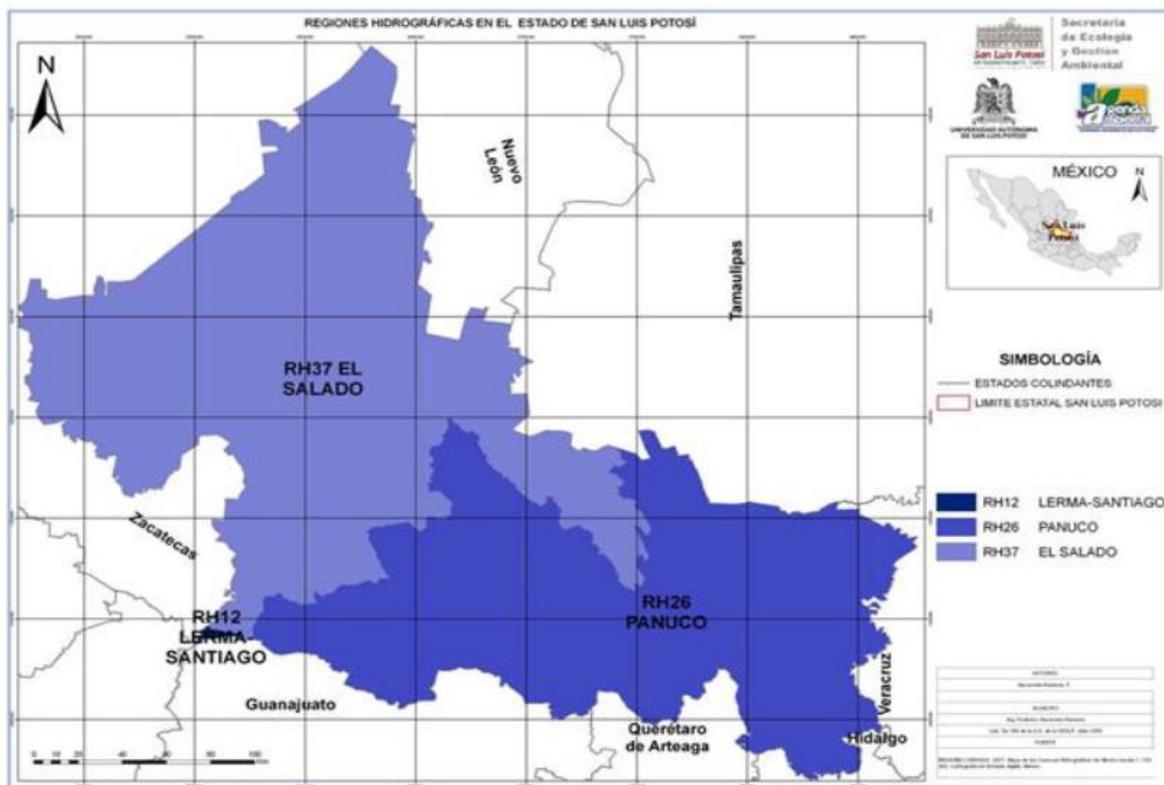


Figura 33. Regiones hidrológicas en el estado de San Luis Potosí.  
Fuente: Ordenamiento Ecológico de San Luis Potosí, 2010.

En la figura 33 podemos notar una parte de la red hidrológica superficial de una parte del estado de San Luis Potosí, los más representativos e importantes el Río Santiago y el Río España.

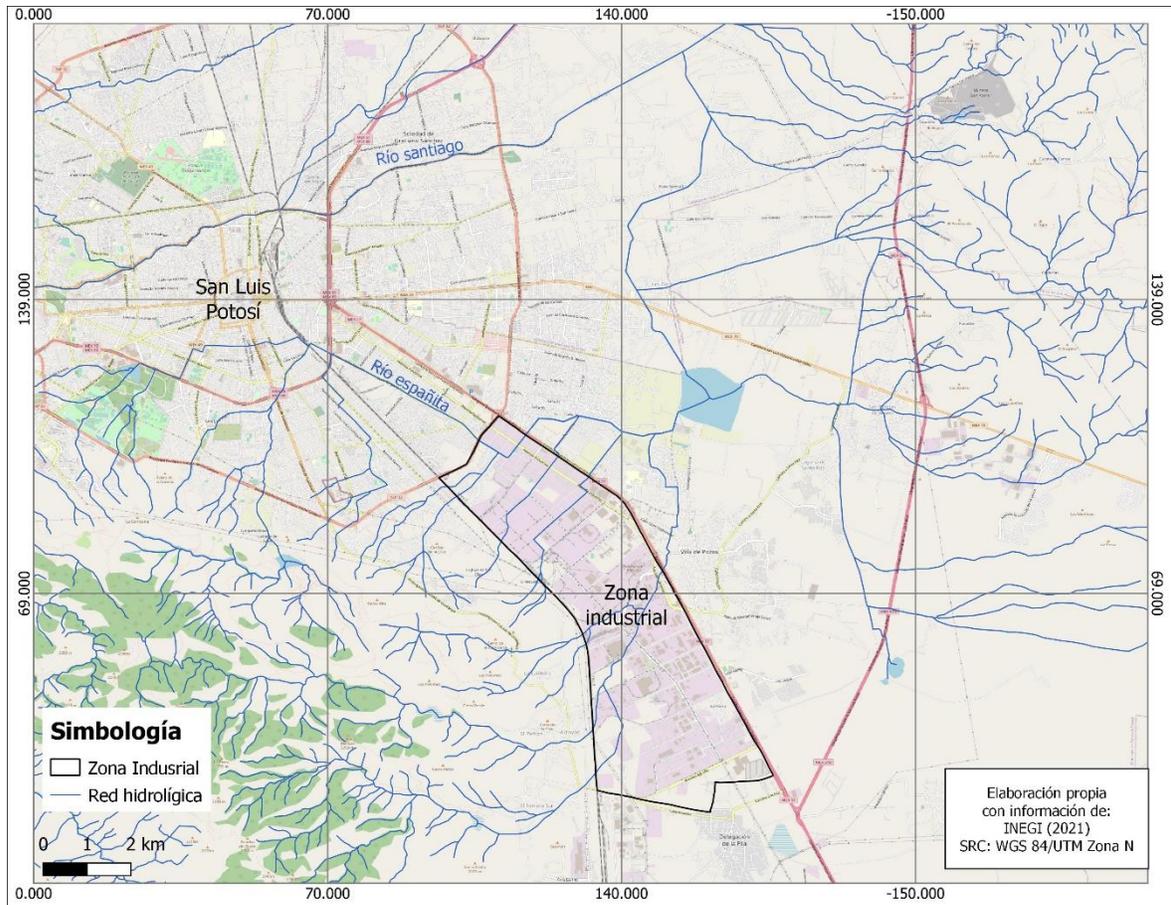


Figura 34. Red hidrológica de la zona de estudio (Elaboración propia con información de INEGI)

### 2.3.4.2 Hidrología subterránea

El acuífero de San Luis Potosí, identificado con la clave 2411 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se encuentra en la parte centro-occidental del estado de San Luis Potosí y cubre una superficie aproximadamente de 1980 km<sup>2</sup> (CONAGUA,2020).

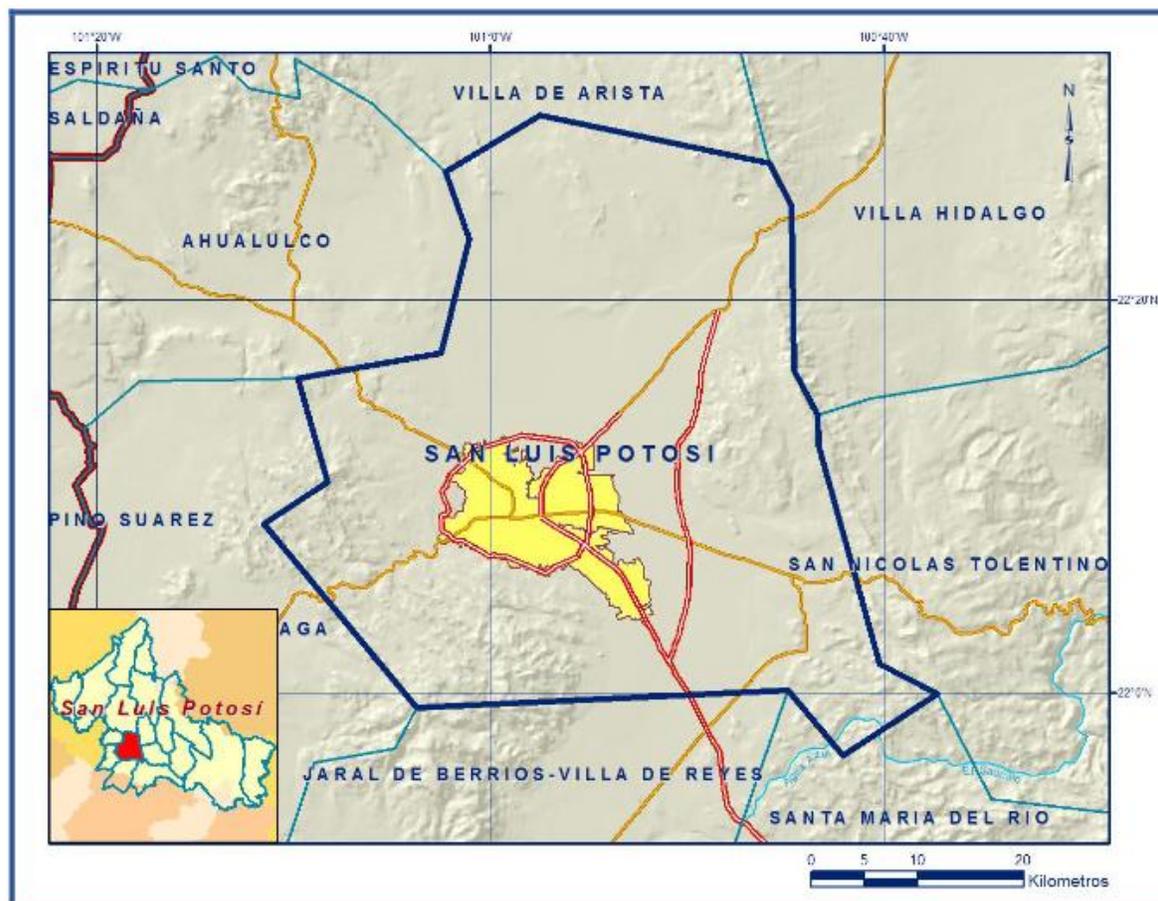


Figura 35. Localización del acuífero 2411 (CONAGUA, 2020)

El acuífero incluye en la totalidad del municipio de Soledad de Graciano Sánchez y abarca la mayor parte de los municipios de San Luis Potosí y Cerro de San Pedro, además de una pequeña porción de los municipios de Mexquitic de Carmona, Ahualulco y Villa de Zaragoza (CONAGUA, 2020).

### 2.3.5 Clima

Los climas del municipio de San Luis Potosí son determinados por un factor orográfico e influidos por factores y elementos del clima relacionados entre sí (latitud, altitud, precipitación, humedad, vegetación, intensidad e incidencia de la radiación solar, etc.).

Tabla 1. Climas en el municipio de San Luis Potosí (IMPLAN, 2021)

Municipio	Tipo de clima	Descripción de la temperatura	Descripción de la precipitación	Superficie (Ha)	% del territorio municipal
San Luis Potosí	Semiárido templado	Con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C.	Lluvia de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2 % del total anual.	39,487.96	26.64
	Árido semicálido	Temperatura entre 18 y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura dl mes más caliente mayor de 22°C		30,114.28	20.32
	Árido templado	Temperatura media anual entre 12 y 18°C temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C.		78,627.81	53.04
<b>Total</b>				148,230.06	100

## CAPÍTULO 3. Evaluación del sistema de drenaje pluvial actual en el norte de la zona industrial.

### 3.1 Ubicación del área de estudio (Norte de la zona industrial)

La zona industrial abarca 2769.307 ha en donde el 32% de esta área se encuentra con riesgo de inundación como se muestra en la figura 35 (PDUCP,2021).

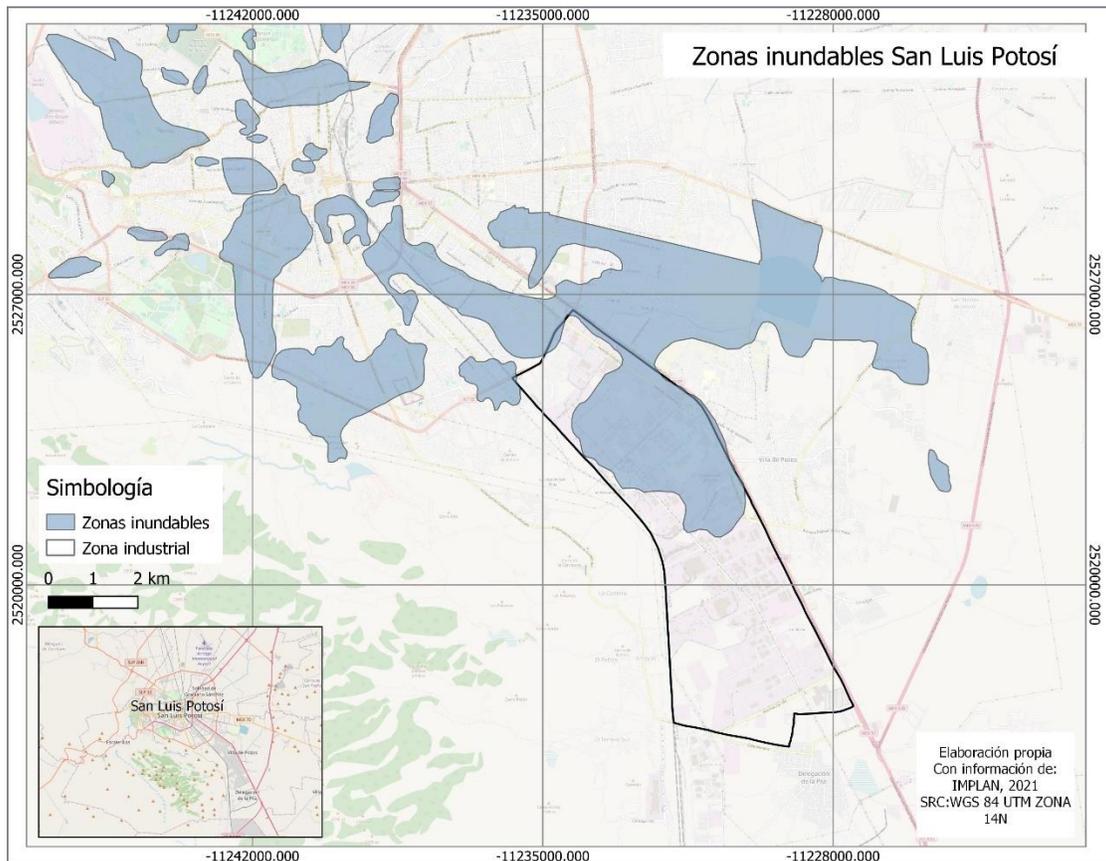


Figura 36. Zonas inundables en el estado de San Luis Potosí (Elaboración propia con información de IMPLAN, 2021).

Este proyecto se centra exclusivamente en un área específica de la zona industrial, situada en la parte norte de la misma y con extensión de 367 hectáreas, como se ilustra en la figura 36.

El área de estudio se encuentra delimitada por las avenidas del Eje 114 y 120, en la parte septentrional de la zona industrial. Según el Plan de Desarrollo Urbano y Control de Pisos porcentaje que supera el 80%, debido a que predominancia de industrias, pavimentos flexibles con asfalto impermeable y pavimentos rígidos construidos con concreto hidráulico.

Esta área está compuesta principalmente por edificaciones que carecen de zonas verdes destinadas a la retención de agua. Esto implica que estas estructuras están diseñadas exclusivamente para canalizar el agua de lluvia que cae sobre ellas hacia los sistemas de drenaje pluvial, que a su vez la conducen hacia el alcantarillado pluvial.

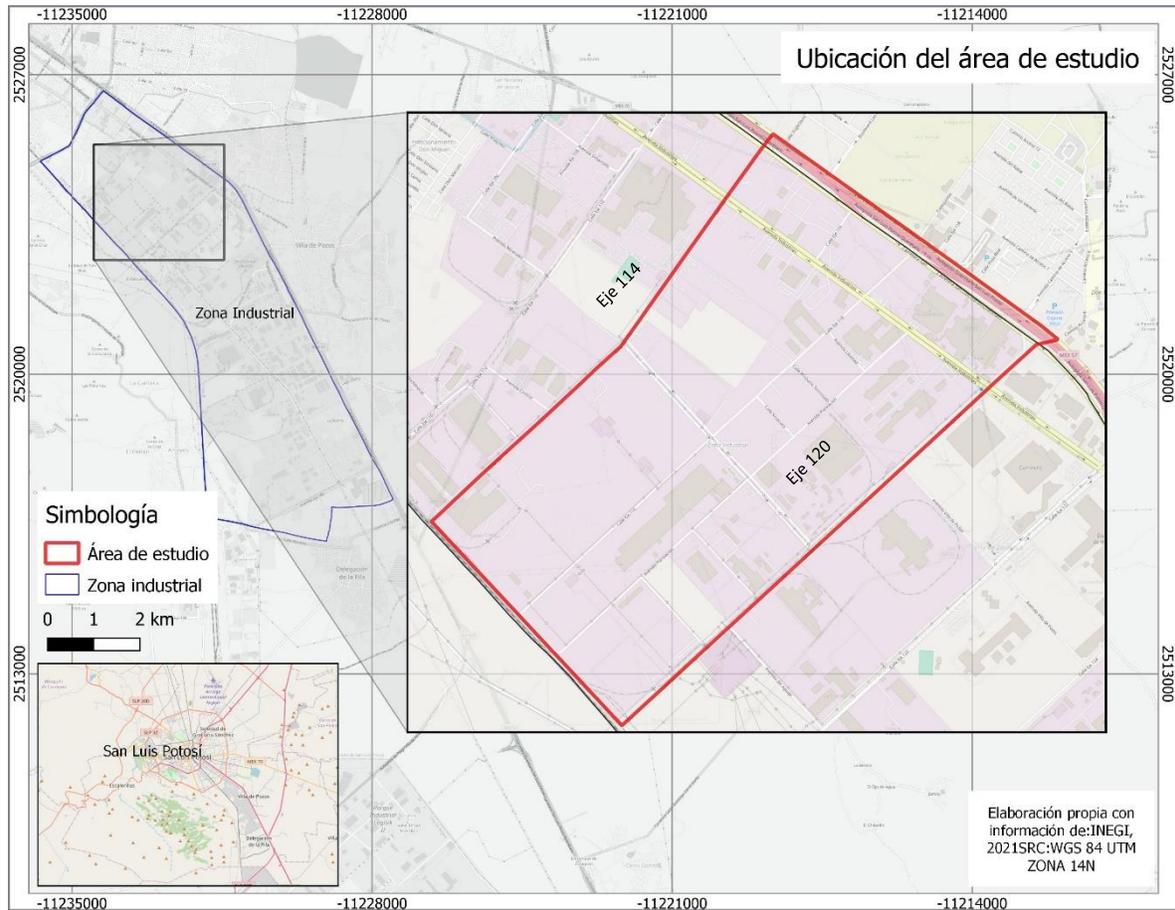


Figura 37. Ubicación del área de estudio en la parte norte de la zona industrial

### 3.2 Análisis hidrológico de la cuenca urbana

#### 3.2.1 Estaciones climatológicas en la región de estudio

Con la información del Servicio Meteorológico Nacional, se obtuvieron las estaciones meteorológicas de México (archivo KML), donde se seleccionaron 12 estaciones meteorológicas considerando el polígono de la zona industrial.

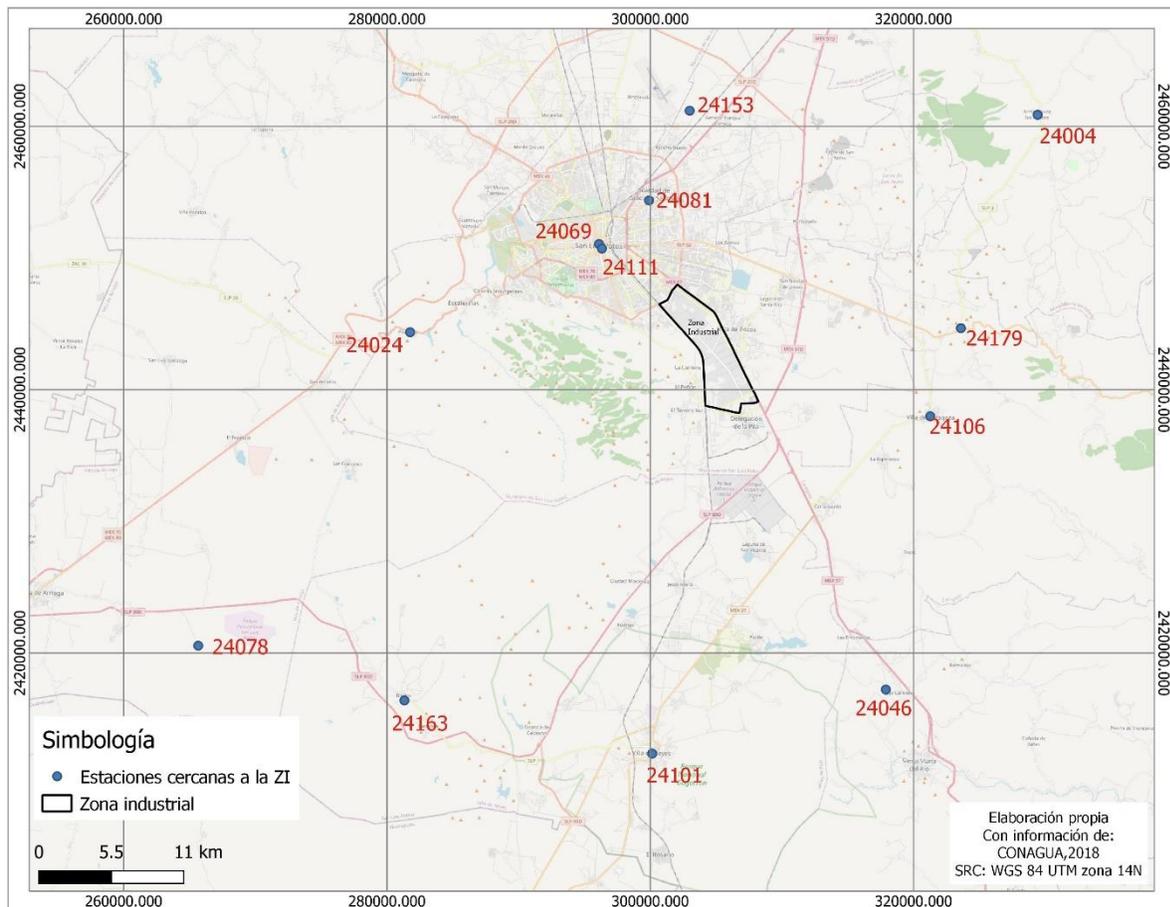


Figura 38. Estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio, elaboración propia con información de CONAGUA.

Tabla 2. Estaciones seleccionadas para la zona de estudio con las coordenadas Este y Norte (CONAGUA, sf)

NUMERO	NOMBRE	X(m)	Y(m)
24004	ARMADILLO DE LOS INFANTE	329414.00	2460877.00
24024	EL PEAJE (SAN LUIS POTOSÍ)	281759.00	2444368.00
24046	OJO CALIENTE	317886.00	2417236.00
24069	LOS FILTROS	296102.05	2451066.48

<b>24078</b>	SANTIAGO	265664.80	2420565.25
<b>24081</b>	SOLEDAD DE GRACIANO SÁNCHEZ	299899.53	2454373.11
<b>24101</b>	VILLA DE REYES	300142.65	2412374.17
<b>24106</b>	ZARAGOZA	321258.69	2437990.91
<b>24111</b>	SAN LUIS POTOSÍ	296324.35	2450720.38
<b>24153</b>	COLONIA BENITO JUAREZ	302987.02	2461187.99
<b>24163</b>	BLEDOS	281322.01	2416408.71
<b>24179</b>	XOCONOXTLE	323587.36	2444676.28

### 3.2.1 Estimación de datos faltantes

Como lo menciona Campos (1998) los datos o valores faltantes de un registro de lluvias se pueden dar por desperfectos en el equipo de mediciones, limitaciones presupuestales, etc. En general los datos faltantes son estimados en base a los registros de las estaciones cercanas a la zona de interés.

#### 3.2.2.1 Método de la relación normalizada

En este método la lluvia anual (o mensual) faltante en una estación pluviométrica, se estima a partir de valores observados en tres estaciones cercanas, situadas uniformemente alrededor de la estación incompleta y que contengan los registros faltantes. Si la precipitación media anual (o media mensual) de cada una de las estaciones auxiliares está dentro de un 10% de la registrada en la estación incompleta, se usará el promedio aritmético de las tres estaciones para estimar el dato anual (o mensual) faltante (Campos, 1998).

Si la precipitación media anual (o media mensual) de cualquiera de las estaciones auxiliares difiere en más de un 10% de la media en la estación incompleta, el dato faltante será determinado por el Método de la relación normalizada, en el cual los valores observados en las estaciones auxiliares son ponderados mediante las relaciones o cocientes a la precipitación media anual (o media mensual) correspondiente. Es decir, que el dato faltante anual (o mensual)  $P_x$  será igual a:

$$P_x = \frac{N_x}{N_A} P_A + \frac{N_x}{N_B} P_B + \frac{N_x}{N_C} P_C$$

En donde:

$N_x$  = Precipitación media anual (o media mensual en la estación incompleta en milímetros).

$N_A, N_B, N_C$  = Precipitación media anual (o media mensual) en las estaciones auxiliares A, B, C, en milímetros.

$P_A, P_B, P_C$  = Precipitación anual (o mensual) observada en las estaciones A, B, C para la misma fecha que la faltante en milímetros.

### 3.2.2.2 Método racional deductivo

Cuando en un registro de lluvias mensuales de una determinada estación, existen uno o más años incompletos, el método racional deductivo es el que permite estimar los registros mensuales faltantes (como máximo once).

$$P_i = \left( \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \right) * S_i$$

En donde:

$P_i$  = Precipitación mensual desconocida en cada año incompleto, en milímetros.

$i$  = Cada uno de los meses desconocidos, como máximo pueden ser once.

$\sum S_i$  = Suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce, en porcentaje.

$\sum P$  = Suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos, en milímetros.

$S_i$  = Porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

Para este proyecto, se completaron los datos faltantes para las doce estaciones seleccionada, para así poder utilizar la información para las demás pruebas.

Tabla 3. Estación 24179-Xoconoxtle presentando datos faltantes en su contenido

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	2.5	0.9	11.3
1981	21.1	1.1	0.7	24.9	4.2	107.0	31.9	48.4	31.9	13.6	0.0	1.5
1982	0.0	0.6	0.0	11.4	37.1	1.7	18.9	24.6	27.0	52.7	10.7	13.2
1983	1.4	0.0	0.0	0.0	16.7	S/D	108.4	26.9	13.5	37.7	1.3	0.0
1984	1.3	15.0	0.0	0.0	38.0	40.6	135.7	2.4	151.7	20.0	2.0	20.0
1985	0.0	0.0	8.0	32.0	65.0	116.6	112.4	112.6	29.0	7.1	5.0	0.0

<b>1986</b>	0.0	0.0	0.0	65.4	5.0	17.0	32.1	12.4	16.7	54.7	53.6	S/D
<b>1987</b>	1.3	0.1	0.0	23.1	78.6	1.7	23.1	0.2	14.6	0.3	0.7	0.0
<b>1988</b>	0.9	0.0	17.0	30.4	48.7	44.6	109.4	112.6	21.7	0.0	0.0	0.4
<b>1989</b>	0.0	1.0	0.0	13.2	17.0	70.5	13.0	121.5	33.0	0.0	9.0	27.0
<b>1990</b>	4.0	14.0	3.0	10.0	32.0	17.0	66.0	101.0	65.0	73.0	15.0	10.0
<b>1991</b>	20.0	78.0	0.0	0.0	129.0	82.0	152.0	14.0	141.0	72.0	2.0	19.0
<b>1992</b>	92.0	10.0	10.0	14.0	65.0	67.0	29.0	28.0	39.0	24.0	21.0	4.0
<b>1993</b>	0.0	0.0	0.0	1.0	34.0	168.0	38.0	22.0	258.0	13.0	6.0	0.0
<b>1994</b>	2.0	0.0	11.0	194.0	31.0	42.0	43.0	42.0	70.0	34.0	7.0	0.0
<b>1995</b>	6.0	2.0	1.0	0.0	35.0	32.0	S/D	183.0	0.0	0.0	7.0	25.0
<b>1996</b>	0.0	0.0	2.0	9.0	12.0	47.0	14.0	150.0	166.0	23.0	2.0	0.0
<b>1997</b>	12.0	20.0	40.0	117.0	83.0	63.0	86.0	20.3	14.0	28.0	1.0	0.0
<b>1998</b>	0.0	4.0	0.0	0.0	19.0	89.0	15.0	62.0	138.0	80.0	0.0	0.0
<b>1999</b>	0.0	0.0	1.0	9.0	0.0	78.0	118.0	12.0	144.0	0.0	10.0	1.0
<b>2000</b>	6.0	0.0	3.0	20.0	6.0	83.0	4.0	44.0	27.0	53.0	15.0	15.0
<b>2001</b>	7.0	11.0	2.0	24.0	66.0	64.0	52.0	106.0	105.0	11.0	11.0	S/D
<b>2002</b>	30.0	32.1	0.0	10.0	32.0	34.0	68.0	30.0	98.0	65.0	19.0	0.0
<b>2003</b>	14.0	6.0	1.0	33.0	1.0	17.0	133.0	26.0	90.0	S/D	4.0	0.0
<b>2004</b>	24.0	13.0	30.0	3.0	23.0	91.0	73.0	10.0	128.0	15.0	0.0	11.0
<b>2005</b>	2.0	24.0	5.0	1.0	40.0	22.0	46.0	86.0	63.0	32.0	0.0	0.0
<b>2006</b>	18.0	0.0	5.0	14.0	56.0	4.0	69.0	122.0	71.0	40.0	24.0	13.0
<b>2007</b>	15.0	21.0	3.0	19.0	47.0	2.5	65.0	55.0	45.0	8.0	20.0	0.0
<b>2008</b>	0.0	0.0	0.0	1.0	15.0	41.0	78.0	152.0	74.0	25.0	2.0	0.0
<b>2009</b>	1.0	0.0	10.0	0.0	61.0	14.0	15.0	23.0	87.0	58.4	0.0	19.0
<b>2010</b>	46.0	104.0	0.0	13.0	40.0	S/D	180.0	45.0	49.0	0.0	0.0	0.0
<b>2011</b>	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	81.0	140.0	24.0	80.0	3.0	9.0	0.0
<b>2012</b>	6.0	59.0	5.0	6.0	3.0	27.0	48.0	58.0	5.0	1.0	5.0	1.0
<b>2013</b>	15.0	0.0	1.0	0.0	7.0	61.0	75.0	70.0	168.0	50.0	48.0	41.0
<b>2014</b>	19.0	0.0	5.0	11.0	27.0	64.0	31.0	40.0	157.0	14.0	34.0	6.0
<b>2015</b>	18.0	0.0	67.0	22.0	89.0	98.0	13.0	67.0	40.0	75.0	7.0	0.0
<b>2016</b>	4.0	16.0	0.0	7.0	11.0	72.0	21.0	67.0	71.0	25.0	29.0	1.0
<b>2017</b>	0.0	4.0	3.0	3.0	27.0	71.0	44.0	89.0	52.0	57.0	0.0	0.0
<b>2018</b>	4.0	24.0	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D

Tabla 4. Estación 24179-Xoconoxtle datos faltantes completados

<b>AÑO</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
<b>1980</b>	3.8	4.0	2.3	6.4	15.0	4.9	19.6	52.0	25.4	2.5	0.9	11.3
<b>1981</b>	21.1	1.1	0.7	24.9	4.2	107.0	31.9	48.4	31.9	13.6	0.0	1.5
<b>1982</b>	0.0	0.6	0.0	11.4	37.1	1.7	18.9	24.6	27.0	52.7	10.7	13.2

<b>1983</b>	1.4	0.0	0.0	0.0	16.7	21.4	108.4	26.9	13.5	37.7	1.3	0.0
<b>1984</b>	1.3	15.0	0.0	0.0	38.0	40.6	135.7	2.4	151.7	20.0	2.0	20.0
<b>1985</b>	0.0	0.0	8.0	32.0	65.0	116.6	112.4	112.6	29.0	7.1	5.0	0.0
<b>1986</b>	0.0	0.0	0.0	65.4	5.0	17.0	32.1	12.4	16.7	54.7	53.6	4.7
<b>1987</b>	1.3	0.1	0.0	23.1	78.6	1.7	23.1	0.2	14.6	0.3	0.7	0.0
<b>1988</b>	0.9	0.0	17.0	30.4	48.7	44.6	109.4	112.6	21.7	0.0	0.0	0.4
<b>1989</b>	0.0	1.0	0.0	13.2	17.0	70.5	13.0	121.5	33.0	0.0	9.0	27.0
<b>1990</b>	4.0	14.0	3.0	10.0	32.0	17.0	66.0	101.0	65.0	73.0	15.0	10.0
<b>1991</b>	20.0	78.0	0.0	0.0	129.0	82.0	152.0	14.0	141.0	72.0	2.0	19.0
<b>1992</b>	92.0	10.0	10.0	14.0	65.0	67.0	29.0	28.0	39.0	24.0	21.0	4.0
<b>1993</b>	0.0	0.0	0.0	1.0	34.0	168.0	38.0	22.0	258.0	13.0	6.0	0.0
<b>1994</b>	2.0	0.0	11.0	194.0	31.0	42.0	43.0	42.0	70.0	34.0	7.0	0.0
<b>1995</b>	6.0	2.0	1.0	0.0	35.0	32.0	23.0	183.0	0.0	0.0	7.0	25.0
<b>1996</b>	0.0	0.0	2.0	9.0	12.0	47.0	14.0	150.0	166.0	23.0	2.0	0.0
<b>1997</b>	12.0	20.0	40.0	117.0	83.0	63.0	86.0	20.3	14.0	28.0	1.0	0.0
<b>1998</b>	0.0	4.0	0.0	0.0	19.0	89.0	15.0	62.0	138.0	80.0	0.0	0.0
<b>1999</b>	0.0	0.0	1.0	9.0	0.0	78.0	118.0	12.0	144.0	0.0	10.0	1.0
<b>2000</b>	6.0	0.0	3.0	20.0	6.0	83.0	4.0	44.0	27.0	53.0	15.0	15.0
<b>2001</b>	7.0	11.0	2.0	24.0	66.0	64.0	52.0	106.0	105.0	11.0	11.0	8.4
<b>2002</b>	30.0	32.1	0.0	10.0	32.0	34.0	68.0	30.0	98.0	65.0	19.0	0.0
<b>2003</b>	14.0	6.0	1.0	33.0	1.0	17.0	133.0	26.0	90.0	51.8	4.0	0.0
<b>2004</b>	24.0	13.0	30.0	3.0	23.0	91.0	73.0	10.0	128.0	15.0	0.0	11.0
<b>2005</b>	2.0	24.0	5.0	1.0	40.0	22.0	46.0	86.0	63.0	32.0	0.0	0.0
<b>2006</b>	18.0	0.0	5.0	14.0	56.0	4.0	69.0	122.0	71.0	40.0	24.0	13.0
<b>2007</b>	15.0	21.0	3.0	19.0	47.0	2.5	65.0	55.0	45.0	8.0	20.0	0.0
<b>2008</b>	0.0	0.0	0.0	1.0	15.0	41.0	78.0	152.0	74.0	25.0	2.0	0.0
<b>2009</b>	1.0	0.0	10.0	0.0	61.0	14.0	15.0	23.0	87.0	58.4	0.0	19.0
<b>2010</b>	46.0	104.0	0.0	13.0	40.0	39.4	180.0	45.0	49.0	0.0	0.0	0.0
<b>2011</b>	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	81.0	140.0	24.0	80.0	3.0	9.0	0.0
<b>2012</b>	6.0	59.0	5.0	6.0	3.0	27.0	48.0	58.0	5.0	1.0	5.0	1.0
<b>2013</b>	15.0	0.0	1.0	0.0	7.0	61.0	75.0	70.0	168.0	50.0	48.0	41.0
<b>2014</b>	19.0	0.0	5.0	11.0	27.0	64.0	31.0	40.0	157.0	14.0	34.0	6.0
<b>2015</b>	18.0	0.0	67.0	22.0	89.0	98.0	13.0	67.0	40.0	75.0	7.0	0.0
<b>2016</b>	4.0	16.0	0.0	7.0	11.0	72.0	21.0	67.0	71.0	25.0	29.0	1.0
<b>2017</b>	0.0	4.0	3.0	3.0	27.0	71.0	44.0	89.0	52.0	57.0	0.0	0.0
<b>2018</b>	4.0	24.0	7.8	21.9	51.0	156.1	5.3	47.6	105.3	31.8	41.0	9.1

### 3.2.3 Pruebas de homogeneidad e independencia

Tal como Campos (1998) menciona el concepto de homogeneidad de la serie. Una serie de datos es llamada homogénea si es una muestra de una única población. Si la serie es no homogénea, se deben realizar ajustes o correcciones para volverla homogénea.

La homogeneidad de una serie se puede perder por algunas causas las cuales pueden ser diferenciadas en dos grupos: primero, las debidas a cambios físicos en la propia estación pluviométrica y segundo, las originadas por las modificaciones o cambios en el medio ambiente.

1. Cambio en la localización del pluviómetro
2. Cambio en la forma de exposición, o reposición del aparato.
3. Cambio en el procedimiento de observación, o reemplazo del operador.
4. Construcción de embalses en las cercanías
5. Deforestaciones y reforestaciones en la zona
6. Deseccación de pantanos
7. Apertura de nuevas áreas al cultivo en los alrededores
8. Industrialización en áreas circundantes.

#### 3.2.3.1 Prueba de Helmer (Homogeneidad)

La prueba de Helmer consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, una secuencia (S) es creada. En contraste, si una desviación es seguida por otra de signo – contrario, un cambio (C) será registrado. Cada año, excepto el primero, definirán una secuencia o un cambio (Campos, 1998).

$$S - C = \pm \sqrt{n - 1}$$

#### 3.2.3.2 Prueba de Anderson (Independencia)

De acuerdo con Campos (2010) esta prueba es a través de la persistencia, la cual se cuantifica con base en el coeficiente de correlación serial de orden k, el cual

indica que tan fuertemente es afectado un evento por el anterior a él, el cual está desfasado o tiene un retraso k.

El coeficiente de correlación serial de orden 1 ( $r_1$ ), se cuantifica para un registro o serie anual de máximo de tamaño n, por medio de la ecuación de  $r_1$ , haciendo parejas x, y de un dato con el siguiente, después ese con el que sigue y así sucesivamente; se forman parejas como n-1.

La prueba de Anderson indica cuando el valor calculado de  $r_1$  no excede al intervalo definido por los límites de control (Lc), no es estadísticamente diferente de cero y por lo tanto la persistencia no existe. La expresión para calcular Lc es la siguiente:

$$Lc = \frac{-1.000 \pm 1.964\sqrt{(n-2)}}{(n-1)}$$

El signo que se usa en la ecuación anterior corresponde al de  $r_1$ . La condición de independencia en los datos de una serie anual de máximos. La fórmula para el cálculo de  $r_1$  es:

$$r_{xy} = \frac{[\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})(yi - y)]}{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (yi - y)^2}]} = \frac{Covarianza}{\sqrt{Sx^2 * Sy^2}}$$

Se realizó la prueba de Helmert y Anderson a las 12 estaciones seleccionadas y se seleccionaron para trabajar las estaciones que marcaron homogeneidad e independencia en sus datos

Tabla 5. Resultado del análisis de homogeneidad e independencia

NÚMERO	NOMBRE	HOMOGENEIDAD	INDEPENDENCIA
24004	ARMADILLO DE LOS INFANTE	No homogénea	Independiente
24024	EL PEAJE (SAN LUIS POTOSÍ)	Homogénea	Independiente
24046	OJO CALIENTE	Homogénea	Independiente
24069	LOS FILTROS	No homogénea	Independiente
24078	SANTIAGO	Homogénea	Independiente
24081	SOLEDAD DE GRACIANO SÁNCHEZ	No homogénea	Independiente
24101	VILLA DE REYES	No homogénea	Independiente
24106	ZARAGOZA	Homogénea	Dependiente

24111	SAN LUIS POTOSÍ	Homogénea	Independiente
24153	COLONIA BENITO JUAREZ		Datos insuficientes
24163	BLEDOS	No homogénea	Independiente
24179	XOCONOXTLE	Homogénea	Independiente

Para los próximos cálculos, se seleccionaron solo se seleccionaron las que estaban cercanas a la zona y que en la prueba de Anderson diera independiente.

Tabla 6. Estaciones seleccionadas para realizar los cálculos en la zona de estudio

NÚMERO	NOMBRE
24024	EL PEAJE (SAN LUIS POTOSÍ)
24069	LOS FILTROS
24081	SOLEDAD DE GRACIANO SÁNCHEZ
240179	XOCONOXTLE

### 3.2.4 Cálculo de la precipitación máxima probable (PMP) e Intensidad de lluvia

La precipitación máxima probable (PMP) se define como la máxima altura de precipitación estimada analíticamente para una determinada duración, de tal forma que caracterice razonablemente una región geográfica y que sea físicamente posible en un determinado periodo del año. En resumen, la PMP es el valor límite estimado de precipitación. En la práctica no se tiene en cuenta los efectos del cambio de clima a largo plazo para la estimación de la PMP.

En las aplicaciones prácticas, se ha encontrado que la PMP es útil y su uso continuará debido a la preocupación pública acerca de la seguridad de proyectos para grandes empresas (Chow et al., 1994).

#### **Cálculo de las variables pluviométricas mediante Gumbel**

En un estudio de gastos picos en una estación hidrométrica se utilizan solamente valores máximos registrado cada año, entre todos los valores registrados. Es por eso que se utiliza la función de valores registrados. Es por ello que se utiliza la función de valores extremos I o también llamada Gumbel en hidrología, ya que esta función de distribución se utiliza para determinar la probabilidad de que se presenten

grandes avenidas, debido a que se han demostrado teóricamente que se ajusta a los valores máximos (Chow et al., 1994).

La función de distribución de probabilidad se representa por la siguiente ecuación:

$$f(x) = e^{-e^{\alpha(x-\beta)}}$$

La función de densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta)-e^{-\alpha(x-\beta)}]}$$

Donde:

$\alpha$ = Parámetro de forma

$\beta$ = Parámetro de escala

$\bar{x}$ = variable aleatoria

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se estiman por el método de momentos como:

$$\alpha = \frac{1.2825}{s}$$

$$\beta = \bar{x} - 0.45s$$

Donde **s** es la desviación estándar que se calcula con la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$\bar{x}$  representa la media de la muestra, la cual se calculará con la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

La distribución de probabilidad de Gumbel se utiliza para el estudio de los gastos máximos anuales de un río o de precipitaciones máximas anuales en un sitio, y por tanto para la determinación de avenidas de diseño.

Se puede definir a una variable reducida  $y$  como:

$$y = -\alpha(x - \beta)$$

Si sustituimos la variable reducida en la función de distribución de probabilidad se tiene que:

$$f(x) = e^{-e^y}$$

Realizando el cálculo de las variables probabilísticas, los resultados dieron:

$$\bar{x} = 123.35 \text{ mm}$$

$$S = 47.21 \text{ mm}$$

$$\alpha = 36.81 \text{ mm}$$

Después se realizó el cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias

Tabla 7. Precipitaciones diarias máximas probables para distintas frecuencias

Periodo	Variable	Precip.	Prob. de	Corrección
Retorno	Reducida	(mm)	ocurrencia	intervalo fijo
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)
2	0.3665	115.5988	0.5000	130.6266
5	1.4999	157.3190	0.8000	177.7704
10	2.2504	184.9414	0.9000	208.9837
25	3.1985	219.8423	0.9600	248.4218

Después se hizo el cálculo de las precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias

Tabla 8. Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración			
		2 años	5 años	10 años	25 años
24 hr	X24	182.1677	265.1077	320.0212	389.4045
18 hr	X18 = 91%	165.7726	241.2480	291.2192	354.3581
12 hr	X12 = 80%	145.7342	212.0861	256.0169	311.5236
8 hr	X8 = 68%	123.8740	180.2732	217.6144	264.7950
6 hr	X6 = 61%	111.1223	161.7157	195.2129	237.5367
5 hr	X5 = 57%	103.8356	151.1114	182.4121	221.9606
4 hr	X4 = 52%	94.7272	137.8560	166.4110	202.4903
3 hr	X3 = 46%	83.7971	121.9495	147.2097	179.1261
2 hr	X2 = 39%	71.0454	103.3920	124.8082	151.8677
1 hr	X1 = 30%	54.6503	79.5323	96.0063	116.8213

### 3.2.5 Curvas I-D-Tr

Las curvas I-D-Tr, es decir Intensidad- Duración – Periodo de retorno, son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno. Se trata de una representación gráfica de cómo de intensa es una precipitación en función de cuánto dura el episodio de lluvias y con que probabilidad puede excederse ese episodio de lluvias (Chow et al., 1994).

El significado de I-D-Tr se refiere a:

**Intensidad:** La intensidad se refiere a la cantidad de precipitación que cae por unidad de tiempo. Las curvas I-D-Tr muestran cómo varía la intensidad de la lluvia en función a la duración del evento.

**Duración:** La duración se refiere al tiempo que dura un evento de precipitación. Las curvas I-D-Tr muestran cómo la intensidad de la lluvia varía para diferentes duraciones de eventos, por ejemplo, 1 hora, 6 horas, 24 horas, etc.

**Periodo de retorno:** Se refiere a la probabilidad estadística de que ocurra un evento de precipitación de cierta intensidad y duración en un año dado. Las curvas ayudan a estimar la frecuencia en diferentes eventos de precipitación.

Estas curvas son esenciales en hidrología para el diseño de infraestructuras hidráulicas, como sistemas de drenaje y alcantarillado, ya que proporcionan información valiosa sobre la magnitud y la frecuencia de eventos de lluvia que deben ser considerados en el diseño para garantizar la seguridad y eficiencia de las estructuras.

El proceso para obtener curvas I-D-Tr combina tratamientos probabilísticos de datos de lluvia, con tratamientos matemáticos variables que posteriormente conformarán la expresión que permitirá la elaboración de las curvas de intensidad en función de tiempo de lluvia y de periodo de retorno. Las siguientes etapas son las que se deben de seguir para obtener las curvas:

- Seleccionar las estaciones pluviométricas que inciden en la cuenca para recabar sus datos de pluviometría mensual de la precipitación máxima total y máxima en 24h
- Tratamiento probabilístico de los datos para obtener las precipitaciones máximas diarias probables en función de la duración del episodio de precipitación en mm/h
- Distribución de las precipitaciones máximas diarias e intensidades según la influencia de las estaciones asociadas.
- Tratamiento matemático de las intensidades obtenidas mediante regresiones lineales múltiples para cada periodo de retorno y regresión potencial para el conjunto de ellos.
- Obtener la ecuación que define las curvas I-D-Tr para cada periodo de retorno en función de la duración del episodio de precipitación y grafado de la curva.

### Intensidades de lluvia a partir de Pd, según la duración de la precipitación y frecuencia de la misma

La intensidad se calcula con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{P[mm]}{t_{duración}[hr]}$$

Tabla 9. Intensidad de lluvia (mm/hr) según el periodo de retorno

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno			
Hr	Min	2 años	5 años	10 años	25 años
24 hr	1440	7.5903	11.0462	13.3342	16.2252
18 hr	1080	9.2096	13.4027	16.1788	19.6866
12 hr	720	12.1445	17.6738	21.3347	25.9603
8 hr	480	15.4843	22.5342	27.2018	33.0994
6 hr	360	18.5204	26.9526	32.5355	39.5895
5 hr	300	20.7671	30.2223	36.4824	44.3921
4 hr	240	23.6818	34.4640	41.6027	50.6226
3 hr	180	27.9324	40.6498	49.0699	59.7087

<b>2 hr</b>	120	35.5227	51.6960	62.4041	75.9339
<b>1 hr</b>	60	54.6503	79.5323	96.0063	116.8213

Para realizar el hietograma de diseño se utilizaron los valores de intensidad de precipitación según la duración de la misma frecuencia de repetición y considerando hasta el periodo de retorno de 25 años.

Tabla 10. Datos de partida para la construcción de las curvas I-D-Tr con los valores de Intensidad de precipitación según duración de la misma.

<b>Duración (minutos)</b>	<b>Periodo de retorno (años)</b>			
	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	296.52	359.82	416.55	505.48
<b>10</b>	193.42	234.71	271.72	329.73
<b>15</b>	150.65	182.81	211.63	256.81
<b>20</b>	126.17	153.11	177.24	215.08
<b>25</b>	109.96	133.43	154.46	187.44
<b>30</b>	98.27	119.25	138.05	167.52
<b>35</b>	89.36	108.44	125.53	152.33
<b>40</b>	82.30	99.87	115.61	140.30
<b>45</b>	76.54	92.88	107.52	130.47
<b>50</b>	71.72	87.04	100.76	122.27
<b>55</b>	67.63	82.07	95.01	115.29
<b>60</b>	64.10	77.79	90.05	109.27
<b>65</b>	61.01	74.04	85.71	104.01
<b>70</b>	58.29	70.73	81.89	99.37
<b>75</b>	55.86	67.79	78.48	95.23
<b>80</b>	53.68	65.15	75.42	91.52
<b>85</b>	51.72	62.76	72.65	88.16
<b>90</b>	49.93	60.58	70.13	85.11
<b>95</b>	48.29	58.60	67.84	82.32
<b>100</b>	46.79	56.77	65.72	79.76
<b>105</b>	45.40	55.09	63.78	77.39
<b>110</b>	44.12	53.54	61.97	75.21
<b>115</b>	42.92	52.09	60.30	73.17
<b>120</b>	41.81	50.74	58.74	71.28

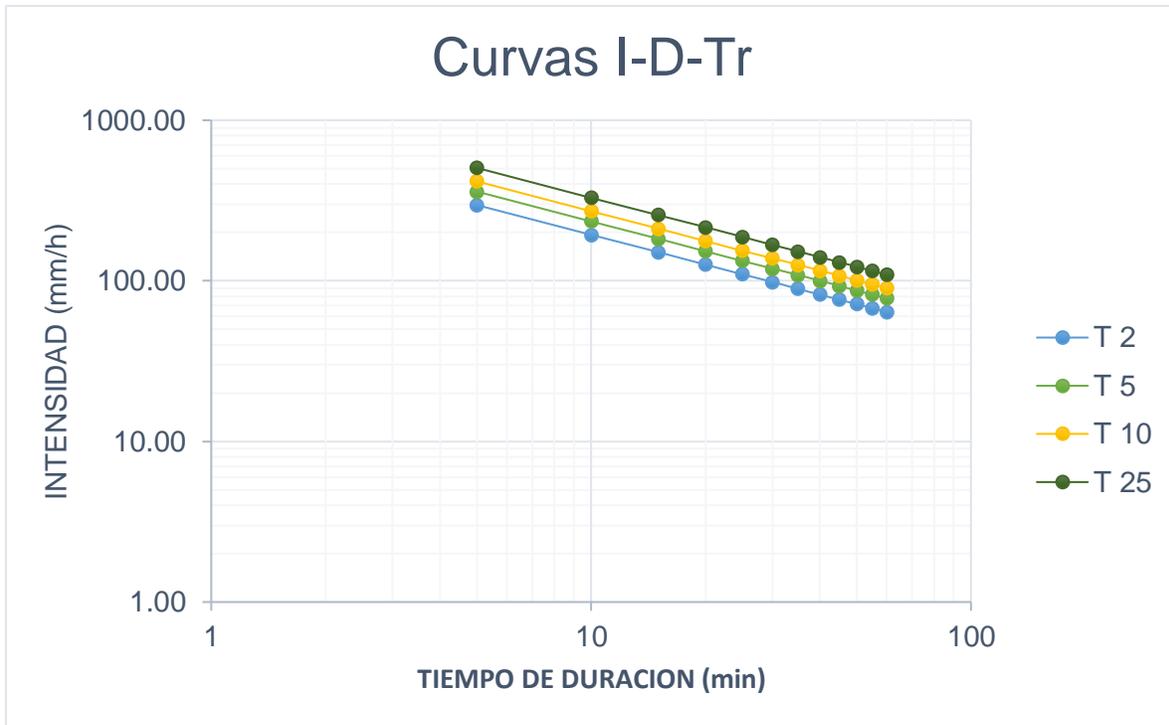


Figura 39. Curvas I-D-Tr Para el periodo de retorno de 2,5,10 y 25 años

Cuando se menciona que ciertas intensidades de precipitación tienen una periodicidad de 2,5,10 y 25 años, se está haciendo referencia al periodo de retorno. El periodo de retorno es una medida estadística que indica la frecuencia promedio con la que se espera que ocurra un evento específico en un intervalo de tiempo determinado (Hernández,2017).

Estos periodos de retorno como (2,5,10 y 25 años) son utilizados en hidrología para el diseño de infraestructuras hidráulicas, como sistemas de drenaje, embalses y canales, con el objetivo de planificar estructuras que sean capaces de manejar eventos de precipitación excepcionales con cierto nivel de seguridad y eficacia. Para los SUDS que se propondrán en el programa SWMM se necesitó saber el comportamiento de la precipitación en distintos años para seleccionar el periodo de retorno específico.

### 3.2.6 Hietograma de diseño

De acuerdo con Hernández (2017), un hidrograma es la representación gráfica de la evolución de un gasto o escurrimiento en una corriente a través del tiempo, de donde se pueden apreciar las variaciones del flujo. La forma de los hidrogramas producidos por tormentas particulares varía no sólo de cuenca a cuenca sino también de tormenta a tormenta, aun así, se distinguen las siguientes partes de cada hidrograma (Figura 39).

- Punto de levantamiento (A). En este punto el agua proveniente de la tormenta comienza a llegar al punto de interés, por lo general a la salida de la cuenca, y se produce inmediatamente después, durante e incluso una vez terminado el tiempo después de la tormenta dependiendo de las características fisiográficas de la cuenca como el tamaño, su sistema de drenaje y suelo, además de la intensidad y duración de la tormenta.
- Pico (B). Es el gasto máximo que se logra al producir por la tormenta. Por lo general es el punto más importante en un hidrograma ya que corresponde al gasto de diseño
- Punto de inflexión (C). Punto de aproximación cuando termina el flujo sobre el terreno y lo que quede de agua después de ese tiempo, ocurre por los canales y también como escurrimiento subterráneo.
- Final del escurrimiento directo (D). De este punto en adelante el escurrimiento que se presenta es sólo subterráneo.
- Tiempo pico ( $T_p$ ). Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta cuando se presenta el pico del hidrograma.
- Tiempo base ( $T_b$ ). Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el final del escurrimiento directo.

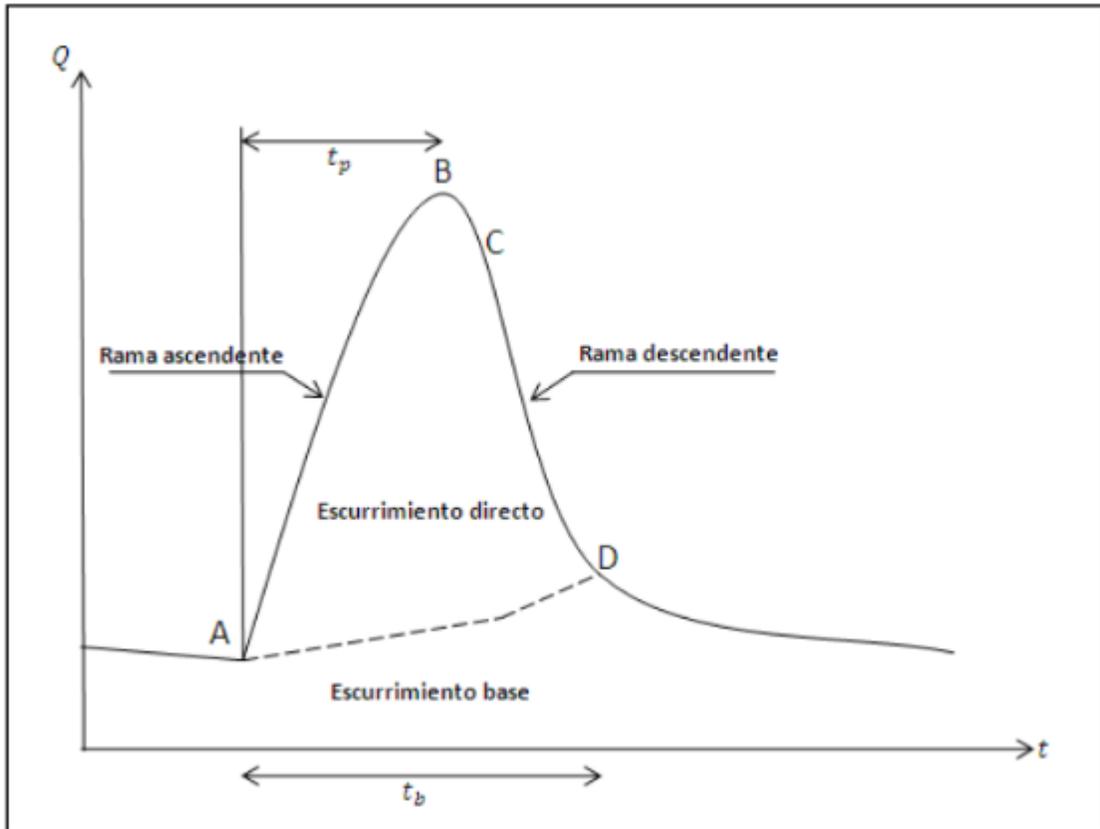


Figura 40. Partes que conforman un hidrograma (Chow et al., 1994)

Para el realizar el hietograma de diseño se tomaron los siguientes datos para un periodo de retorno de dos años y la duración de la lluvia de 2 horas con intervalos de 5 min.

Tabla 11. Hietograma para un periodo de retorno de 2 horas

Duración de la tormenta (h)		2					120 min	
Intensidad de lluvia (mm/h)		41.81						
Precipitación en 24 horas (mm)		83.63						
Intervalos de tiempo (min)		5						
Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)		
5	296.52	24.71	24.71	296.52	1.39	16.69		
10	193.42	32.24	7.53	90.32	1.47	17.68		
15	150.65	37.66	5.43	65.10	1.57	18.83		
20	126.17	42.06	4.39	52.73	1.68	20.21		
25	109.96	45.81	3.76	45.10	1.82	21.89		
30	98.27	49.13	3.32	39.83	2.00	23.99		
35	89.36	52.13	2.99	35.92	2.23	26.71		
40	82.30	54.87	2.74	32.88	2.54	30.43		
45	76.54	57.40	2.54	30.43	2.99	35.92		
50	71.72	59.77	2.37	28.41	3.76	45.10		
55	67.63	62.00	2.23	26.71	5.43	65.10		
60	64.10	64.10	2.10	25.25	24.71	296.52		
65	61.01	66.10	2.00	23.99	7.53	90.32		
70	58.29	68.01	1.91	22.87	4.39	52.73		
75	55.86	69.83	1.82	21.89	3.32	39.83		
80	53.68	71.58	1.75	21.00	2.74	32.88		
85	51.72	73.26	1.68	20.21	2.37	28.41		
90	49.93	74.89	1.62	19.49	2.10	25.25		
95	48.29	76.46	1.57	18.83	1.91	22.87		
100	46.79	77.98	1.52	18.23	1.75	21.00		
105	45.40	79.45	1.47	17.68	1.62	19.49		
110	44.12	80.88	1.43	17.17	1.52	18.23		
115	42.92	82.27	1.39	16.69	1.43	17.17		
120	41.81	83.63	1.35	16.25	1.35	16.25		

Con los datos anteriores, se hizo el cálculo del hietograma de diseño para una duración de tormenta de 2 horas (120 minutos) y para un periodo de retorno de 2 años.

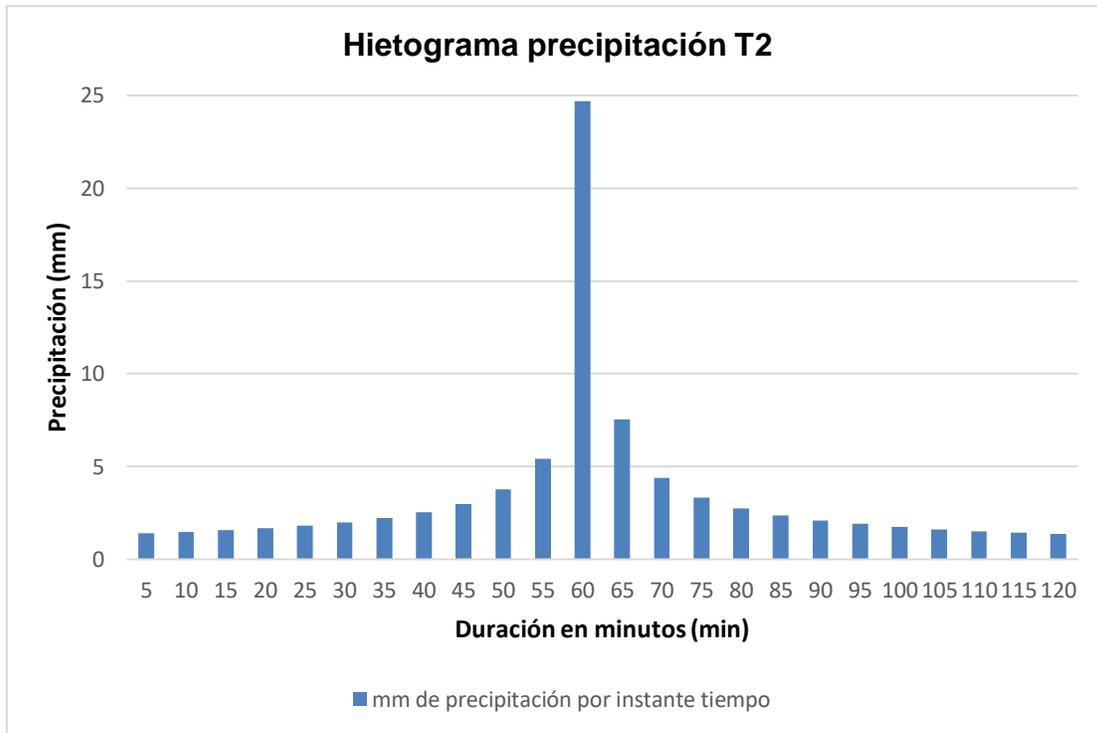


Figura 41. Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 2 años

Un hietograma de diseño de 2 horas para un periodo de retorno de 2 años se refiere a un patrón temporal específico de intensidades de lluvia que se espera que ocurra en un evento de precipitación con una duración de 2 horas, y que tiene una probabilidad de repetirse, en promedio, una vez cada dos años.

En términos más sencillos:

- Duración del Evento: 2 horas
- Periodo de retorno: 2 años

Esto significa que el hietograma está diseñado para simular la distribución temporal de la lluvia durante un evento de 2 horas que, según las estadísticas históricas se espera que ocurra con una frecuencia promedio de una vez cada dos años en la región específica donde se realiza el diseño.

### 3.3 Sistema de drenaje pluvial actual

#### 3.3.1 Programa Storm Water Management Model (SWMM)

De acuerdo al manual SWMM (2005), el *Stormwater Management Model* (modelo de gestión de aguas pluviales) de la EPA (SWMM) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en el periodo extendido. El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona como una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera escorrentía. El módulo de transporte o hidráulico de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores.

#### Aplicaciones típicas del SWMM

El SWMM se ha utilizado para el trazo de redes de evacuación de aguas tanto residuales como pluviales. Entre las aplicaciones típicas se pueden mencionar:

- Diseño y dimensionamiento de componentes de la red de drenaje para prevenir inundaciones
- Dimensionamiento de estructuras de retención y accesorios correspondientes para el control de inundaciones y protección de la calidad de las aguas
- Delimitación de las zonas de inundación en barrancos y cauces naturales
- Diseño de estrategias de control de la red para minimizar el número de descargas de sistemas unitarios.
- Evaluación del impacto de aportes e infiltraciones en las descargas de sistemas de evacuación de las aguas residuales
- Generar cargas de fuentes contaminantes no puntuales para estudios de acumulación de residuos
- Evaluar la eficacia de BMP's para reducir las cargas contaminantes durante una tormenta.

### 3.3.2 Modelo conceptual en SWMM

#### 3.3.2.1 Resultados basados en supuestos

En el desarrollo de esta investigación, se llevaron a cabo diversas etapas, entre ellas la localización del sistema de alcantarillado pluvial actual de la zona de estudio. Los resultados presentados a partir de esta sección se fundamentan en supuestos cuidadosamente considerados y evaluados durante el diseño del proyecto.

#### **Localización del sistema de alcantarillado pluvial actual**

La identificación de la ubicación óptima para el sistema de alcantarillado pluvial implicó la consideración de factores geográficos, topográficos y urbanísticos. Los supuestos adoptados incluyeron (ubicación de las alcantarillas, pozos, diámetros, salida de la escorrentía de las industrias y descarga de las mismas). Estos supuestos fueron validados mediante (revisión exhaustiva en Google Earth, topografía del INEGI y SIG).

#### **Consideraciones y limitaciones**

Es importante reconocer que cualquier proyecto está sujeto a ciertas limitaciones y, en este caso, los resultados presentados dependen de los supuestos establecidos. Las variaciones en las condiciones geográficas, climáticas o urbanísticas podrían afectar la implementación real del sistema propuesto. Por lo tanto, se recomienda considerar estos resultados en conjunto con futuros estudios y actualizaciones de datos.

### 3.3.2.2 Ubicación de colectores en el área de estudio

En el proceso de investigación y recopilación de datos para este estudio, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. **Ubicación Manual del Sistema de Alcantarillado Existente:** Inicialmente se procedió a ubicar de manera manual el sistema de alcantarillado existente utilizando la herramienta Street View de Google Earth. Este paso permitió obtener una vista detallada de la infraestructura existente en el área de estudio
2. **Ubicación de Colectores y Descargas:** Se procedió a identificar y registrar la ubicación de los colectores existentes, así como las descargas asociadas a los mismos. Este paso fue fundamental para comprender la disposición y distribución de la red de alcantarillado.
3. **Identificación del Alcantarillado Pluvial en Avenidas Principales:** Se realizó la identificación específica del sistema de alcantarillado pluvial en cuatro avenidas principales: la Avenida Promoción, el Eje 120, la Avenida Industrias y el Eje 118. Esta información se presenta de manera visual en la figura 41.
4. **Creación de una Tabla de Propiedades de Colectores:** Se concentró la información obtenida en una tabla detallada que muestra las propiedades de los colectores, incluyendo el número de nodos, tramos, tipo de tubería utilizada, longitud de los tramos y otras características relevantes.
5. **Identificación de Tipos de Nodos:** Además de las propiedades de los colectores, se identificó el tipo de nodo asociado a cada punto, diferenciando entre nodos de rejilla, pozos y salidas. Esta clasificación ayudó a comprender la funcionalidad de cada punto en la red de alcantarillado.

Estos pasos se llevaron a cabo de manera rigurosa y sistemática, proporcionando una base sólida de datos que fue fundamental para el desarrollo y análisis de este estudio de alcantarillado.

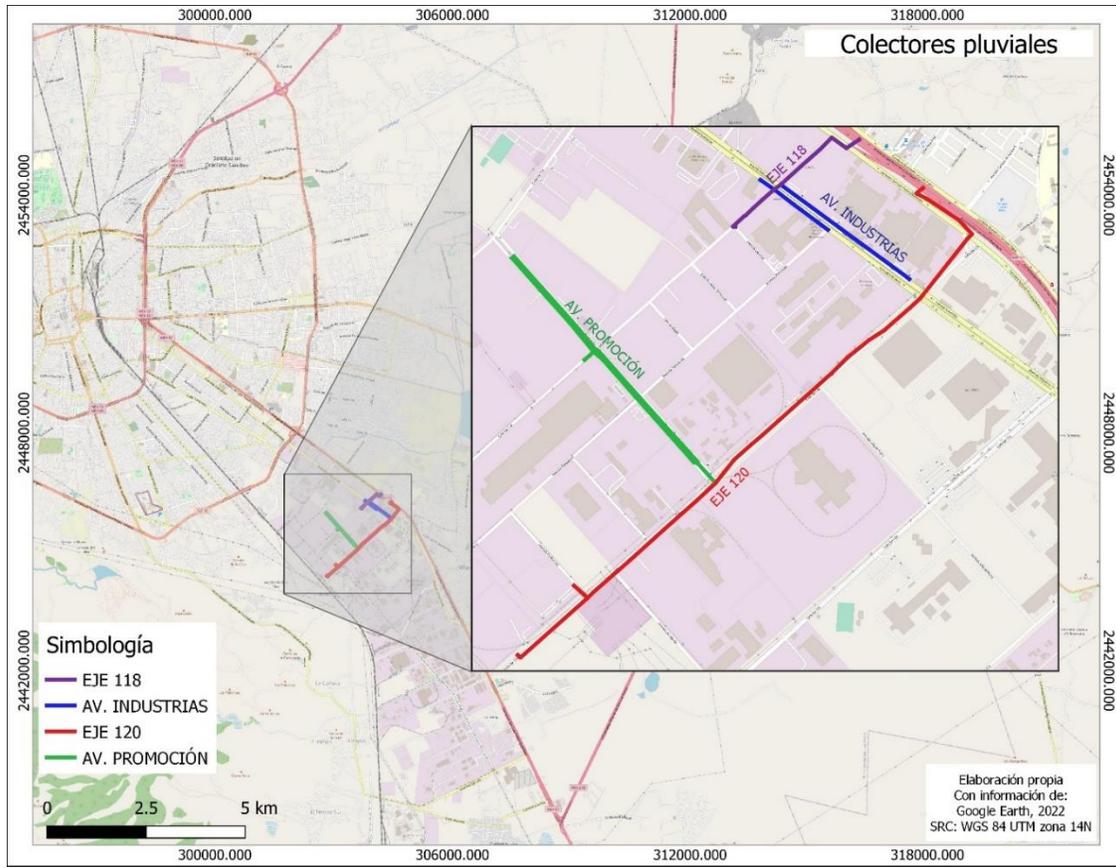


Figura 42. Ubicación del sistema de alcantarillado pluvial actual

Tabla 12. Propiedades de los colectores en la parte norte de la zona industrial

Parte	Colector	Tipo	Nodo /Sal	Tubería	Tramo	Tipo	Material	Cota	Longitud (m)
1	Av. Promoción	Rejilla	N-1	T-1	N1-N2	Tubería	PEAD	1850.31	165.94
	-	Rejilla	N-2	T-2	N2-N3	Tubería	PEAD	1849.79	174.02
	-	Rejilla	N-3	T-3	N3-N4	Tubería	PEAD	1848.96	142.60
	-	POZO 1	N-4	T-4	N4-N5	Tubería	PEAD	1848.66	45.00
	-	Rejilla	N-5	T-5	N5-N6	Tubería	PEAD	1848.45	198.25
	-	Rejilla	N-6	T-6	N6-N7	Tubería	PEAD	1848.28	189.99
	-	Rejilla	N-7	T-7	N7-N8	Tubería	PEAD	1848.19	148.22
	-	Rejilla	N-8	T-14	N8-N15	Tubería	PEAD	1848.00	11.56
	-	Rejilla	N-9	T-8	N9-N10	Tubería	PEAD	1850.31	165.81
	-	Rejilla	N-10	T-9	N10-N11	Tubería	PEAD	1849.76	173.37
	-	Rejilla	N-11	T-10	N11-N12	Tubería	PEAD	1848.83	157.00
	-	Rejilla	N-12	T-11	N12-N13	Tubería	PEAD	1848.63	229.84
	-	Rejilla	N-13	T-12	N13-N14	Tubería	PEAD	1848.57	191.27
	-	Rejilla	N-14	T-13	N-14-N15	Tubería	PEAD	1848.45	148.68

	-	Rejilla	N-15	T-15	N15-N16	Tubería	PEAD	1847.90	16.46
	-	POZO 2	N-16	T-16	N16-N17	Tubería	PEAD	1847.80	50.83
	-	POZO 3	N-17	T-17	N17-N28	Tubería	PEAD	1847.70	45.07
	-	Rejilla	N-18	T-18	N19-N18	Tubería	PEAD	1848.75	25.57
	-	Rejilla	N-19	T-19	N18-N4	Tubería	PEAD	1848.90	21.76
	Eje 120	Rejilla	N-20	T-20	N20-21	Tubería	PEAD	1857.06	15.69
	-	POZO 4	N-21	T-21	N21-N23	Tubería	PEAD	1856.50	347.38
	Producción	Rejilla	N-22	T-22	N22-N23	Tubería	PEAD	1852.60	71.26
	Eje 120	POZO 5	N-23	T-23	N23-N24	Tubería	PEAD	1852.44	12.67
	-	POZO 6	N-24	T-24	N24-N25	Tubería	PEAD	1852.19	209.68
	-	POZO 7	N-25	T-25	N25-N26	Tubería	PEAD	1852.00	174.26
	-	POZO 8	N-26	T-26	N26-N27	Tubería	PEAD	1851.80	168.71
	-	POZO 9	N-27	T-27	N27-N28	Tubería	PEAD	1851.46	95.36
	-	POZO 10	N-28	T-28	N28-N29	Tubería	PEAD	1851.31	136.06
	-	Rejilla	N-29	T-29	N29-N30	Tubería	PEAD	1851.07	63.58
	-	Rejilla	N-30	T-30	N30-N31	Tubería	PEAD	1850.55	70.34
2	-	Rejilla	N-31	T-31	N31-N32	Tubería	PEAD	1850.00	353.70
	-	Rejilla	N-32	T-32	N32-N33	Tubería	PEAD	1849.64	91.20
	-	Rejilla	N-33	T-33	N33-N34	Tubería	PEAD	1849.40	101.45
	-	Rejilla	N-34	T-34	N34-N35	Tubería	PEAD	1848.96	69.82
	-	POZO 11	N-35	T-35	N35-N36	Tubería	PEAD	1848.59	139.28
	-	POZO 12	N-36	T-36	N36-N37	Tubería	PEAD	1848.41	52.97
	-	POZO 13	N-37	T-37	N37-N38	Tubería	PEAD	1848.00	292.28
	-	POZO 14	N-38	T-38	N38-N39	Tubería	PEAD	1847.72	24.55
	Blvrd San Luis	POZO 15	N-39	T-39	N39-N40	Tubería	PEAD	1847.50	91.9
	-	POZO 16	N-40	T-40	N40-N41	Tubería	PEAD	1847.25	122.66
	-	POZO 17	N-41	T-41	N41-N42	Tubería	PEAD	1847.00	44.62
	-	POZO 18	N-42	T-42	N42-Sal-1	Tubería	PEAD	1846.85	24.62
	-	SALIDA	Sal-1			Tubería	PEAD	1846.50	
	Libertad	Rejilla	N-43	T-43	N43-N44	Tubería	PEAD	1847.20	11.84
	Eje 118	POZO 19	N-44	T-44	N44-N45	Tubería	PEAD	1847.09	61.58
	-	POZO 20	N-45	T-45	N45-N46	Tubería	PEAD	1846.71	8.85
	-	Rejilla	N-46	T-46	N46-N47	Tubería	PEAD	1846.65	51.24
	-	POZO 21	N-47	T-47	N47-N48	Tubería	PEAD	1846.60	36.15
	-	POZO 22	N-48	T-48	N48-N49	Tubería	PEAD	1846.55	63.16
	-	POZO 23	N-49	T-49	N49-N56	Tubería	PEAD	1846.50	27.78
3	Av. Industrias	Rejilla	N-50	T-50	N50-N51	Tubería	PEAD	1847.55	163.05
	-	Rejilla	N-51	T-51	N51-N49	Tubería	PEAD	1847.06	98.39
	-	Rejilla	N-53	T-52	N53-N52	Tubería	PEAD	1847.88	124.84
	-	Rejilla	N-52	T-53	N52-N49	Tubería	PEAD	1846.89	67.79
	-	Rejilla	N-54	T-54	N54-N55	Tubería	PEAD	1848.10	27.91

-	Rejilla	N-55	T-55	N55-N56	Tubería	PEAD	1847.50	606.06
-	POZO 24	N-56	T-56	N56-N57	Tubería	PEAD	1846.35	117.66
Eje 118	POZO 25	N-57	T-57	N57-N58	Tubería	PEAD	1846.22	93.83
-	POZO 26	N-58	T-58	N58-N59	Tubería	PEAD	1846.00	60.16
-	Rejilla	N-59	T-59	N59-N60	Tubería	PEAD	1845.80	66.78
-	POZO 27	N-60	T-60	N60-Sal-2	Tubería	PEAD	1845.50	58.15
-	SALIDA	Sal-2			Tubería	PEAD	1845.37	

### 3.3.2.3 Líneas de flujo

Se llevó a cabo la descarga del modelo digital de relieve proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Utilizando el software ArcMap, se generaron curvas de nivel con una separación de 1.5 m con el fin de determinar las altitudes de las alcantarillas mencionadas en la tabla anterior.

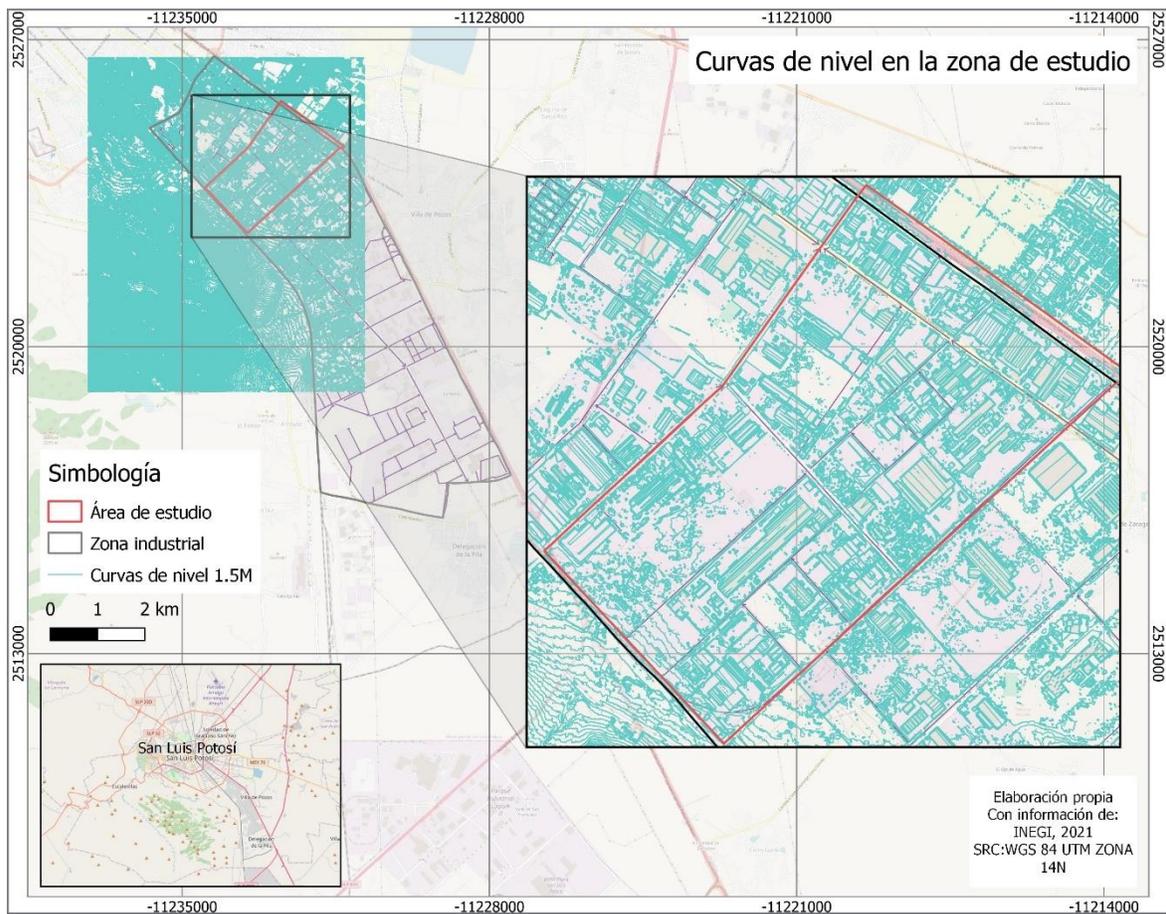


Figura 43. Curvas de nivel a cada 1.5 m en la zona de estudio

Posteriormente, se procedió de manera manual a trazar las líneas de flujo que seguirá el agua con respecto a la topografía de la zona. Este proceso permitió visualizar y analizar la dirección y el comportamiento del flujo de agua en relación con el relieve del terreno.

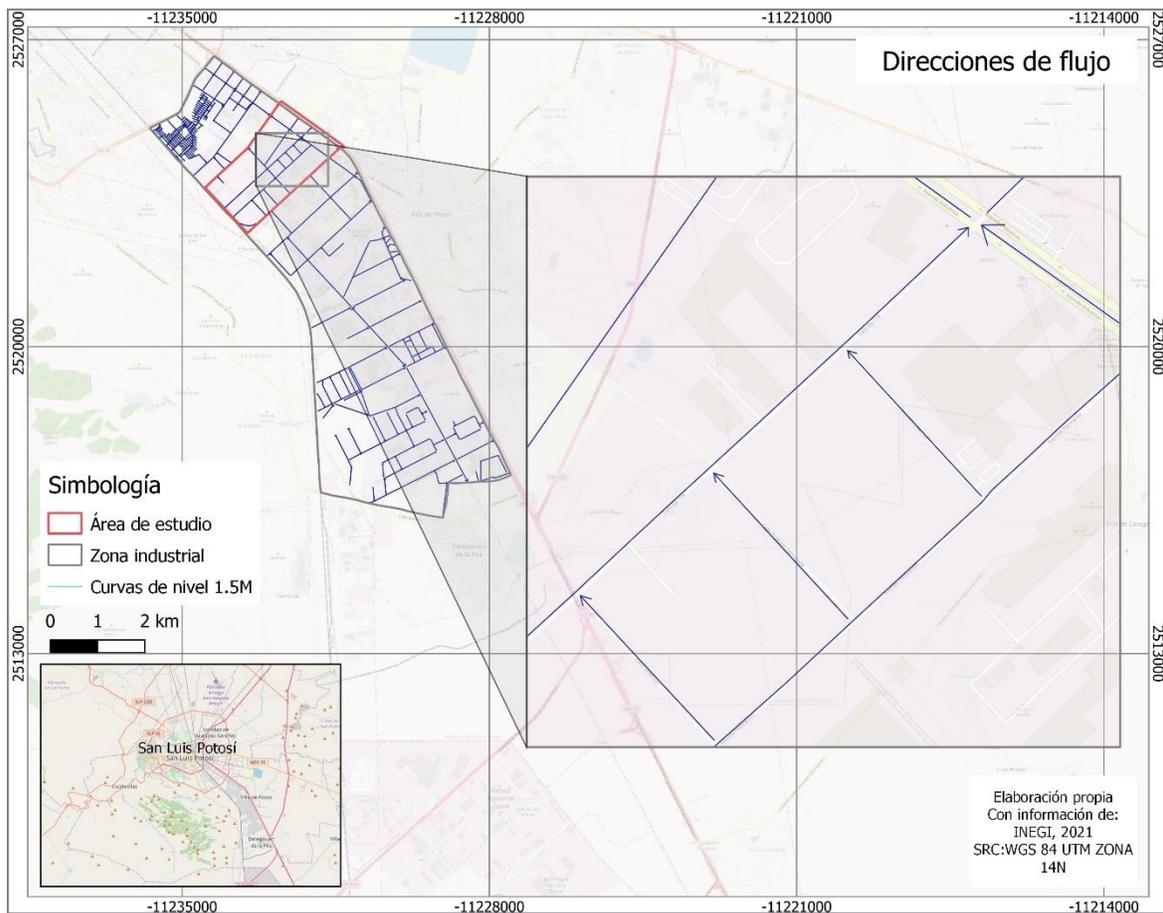


Figura 44. Líneas de flujo en la zona de estudio

### 3.3.2.4 Trazo de subcuencas en SWMM

En el proceso de delineación de las subcuencas para el estudio, se empleó el software QGIS como herramienta fundamental. Mediante esta aplicación, se

procedió a trazar con precisión las subcuencas en relación con las líneas de flujo en la región de interés.

Una etapa crucial de este proceso fue el cálculo de los parámetros esenciales para cada subcuenca, los cuales son de vital importancia para su posterior incorporación en el programa SWMM (Storm Water Management Model). Estos parámetros incluyeron el área total por cada subcuenca, la anchura correspondiente, la pendiente media de la cuenca y el porcentaje de impermeabilidad que caracteriza a cada una de ellas. La información resultante se detalla en la Tabla 13, proporcionando una base sólida para la modelización en SWMM.

Tabla 13. *Parámetros utilizados en las subcuencas*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Descripción</b>
<b>Área</b>	Hectáreas	Área de cada Subcuenca
<b>Width</b>	Metros	Anchura característica del flujo debido a la escorrentía superficial
<b>%Slope</b>	Porcentual	Pendiente media de la cuenca
<b>% Imperv</b>	Porcentual	Área impermeable, Porcentaje de cuenca cuyo suelo es impermeable
<b>N-imperv</b>	Adimensional	Coeficiente n de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable de la cuenca (Tabla 14)
<b>N-Perv</b>	Adimensional	Coeficiente n de Manning para el flujo superficial sobre el área permeable de la cuenca (Tabla 14)

Posteriormente, se procedió a un análisis minucioso del terreno de cada subcuenca de manera individual. Este análisis permitió la asignación adecuada en los

coeficientes de Manning (n) tanto para el área impermeable como para el área no impermeable dentro de cada subcuenca, como se describe en la Tabla 14.

Tabla 14. *Coeficiente de Manning para escorrentía superficial*

<b>Superficie</b>	<b>n</b>
<b>Asfalto liso</b>	0.011
<b>Hormigón liso</b>	0.012
<b>Revestimiento de hormigón basto</b>	0.013
<b>Madera pulida</b>	0.014
<b>Ladrillo con mortero de cemento</b>	0.014
<b>Arcilla vitrificada</b>	0.015
<b>Fundición de hierro</b>	0.015
<b>Tuberías con metal corrugado</b>	0.024
<b>Superficie de escombrera</b>	0.024
<b>Terreno improductivo (libre de residuos)</b>	0.05
<b>Terreno cultivado</b>	
<b>Cubierta de residuos &lt; 20%</b>	0.06
<b>Cubierta de residuos &gt; 20%</b>	0.17
<b>Pasto natural</b>	0.13
<b>Hierba</b>	
<b>Corta, pradera</b>	0.15
<b>Densa</b>	0.24
<b>Hierba <i>Bermuda</i></b>	0.41
<b>Bosque</b>	
<b>Con cubierta ligera de arbustos</b>	0.40
<b>Con cubierta dense de arbustos</b>	0.80

La figura 44 brinda una representación visual de las propiedades esenciales de una subcuenca en el entorno al programa SWMM, destacando especialmente las propiedades mencionadas anteriormente. Este proceso de delineación y caracterización de subcuencas resulta fundamental para el estudio y la gestión efectiva del flujo de agua en la región de estudio, lo que constituye un paso crucial en el desarrollo de esta investigación.

Subcatchment Subc-1

Property	Value
Name	Subc-1
X-Coordinate	302726.126
Y-Coordinate	2444419.828
Description	
Tag	
Rain Gage	Pluv-1
Outlet	N-20
Area	2.68
Width	234.132
% Slope	0.8328
% Imperv	50.75
N-Imperv	0.012
N-Perv	0.0240
Dstore-Imperv	0.05
Dstore-Perv	0.05
%Zero-Imperv	25
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	0
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
N-Perv Pattern	
Dstore Pattern	

Choice of internal routing between pervious and impervious sub-areas

Figura 45. Parámetros utilizados en las subcuencas en SWMM.

Tabla 15. *Propiedades usadas para cada subcuenca en SWMM*

Subcuenca	Área	Descarga	Width	%Slope	% Imperv	N-imperv	N-Perv
1	2.68	N-20	234.132	0.8328	50.75	0.0120	0.0240
2	5.55	N-20	242.945	0.2058	97.41	0.0120	0.1500
3	4.28	N-22	206.346	0.1405	94.39	0.0110	0.1300
4	14.16	N-6	416.389	0.3386	75.57	0.0120	0.0900
5	4.57	N-8	218.863	0.5848	85.12	0.0120	0.0150
6	2.54	N-7	217.997	0.2707	98.14	0.0120	0.1300
7	21.42	N-6	891.850	0.1906	67.37	0.0120	0.0500
8	18.54	N-19	508.413	0.0688	51.08	0.0110	0.0240
9	14.23	N-18	509.103	0.0373	29.52	0.0110	0.0500
10	3.87	N-3	147.290	0.5635	3.36	0.0110	0.1300
11	2.95	N-2	146.690	0.3886	90.64	0.0120	0.0500
12	20.81	N-1	767.230	0.3402	94.80	0.0120	0.0500
13	7.42	N-1	317.395	0.2174	65.50	0.0120	0.0500
14	0.92	N-9	141.732	0.8043	92.76	0.0120	0.1300
15	2.59	N-10	163.015	0.3374	96.14	0.0120	0.1300
16	4.82	N-11	206.937	0.2416	95.86	0.0120	0.0500
17	1.23	N-12	135.243	0.9464	94.22	0.0110	0.0500
18	2.24	N-13	134.595	0.7058	66.39	0.0120	0.1300
19	2.51	N-13	160.295	0.9233	88.05	0.0120	0.0500
20	3.07	N-14	238.430	0.3229	87.62	0.0120	0.0500
21	3.15	N-15	233.085	0.1545	76.19	0.0110	0.1300
22	11.59	N-32	436.651	0.0756	88.87	0.0120	0.0500
23	0.99	N-29	395.673	0.2983	100.00	0.0110	0.0000
24	0.17	N-30	51.223	0.8590	100.00	0.0110	0.0000
25	0.18	N-31	56.799	0.3873	100.00	0.0110	0.0000
26	1.22	N-34	123.442	0.4861	100.00	0.0110	0.0000
27	2.03	N-54	254.279	0.2438	43.84	0.0110	0.0900
28	2.10	N-55	249.934	0.2681	90.48	0.0120	0.0900
29	1.40	N-50	100.870	0.3668	90.85	0.0120	0.0900
30	0.59	N-50	103.229	0.0581	95.27	0.0110	0.1300
31	2.30	N-43	181.363	0.2807	88.26	0.0120	0.0500
32	0.91	N-50	128.930	0.5895	100.00	0.0110	0.0000
33	0.26	N-46	67.241	0.5205	75.38	0.0120	0.1300
34	2.33	N-51	103.993	0.2404	83.26	0.0120	0.1300
35	2.11	N-46	179.170	0.2791	100.00	0.0120	0.0000
36	0.56	N-52	75.581	0.6218	100.00	0.0120	0.0000
37	2.92	N-53	178.924	0.2180	92.46	0.0110	0.1300
38	1.05	N-59	90.970	0.9014	100.00	0.0120	0.0000
39	0.97	N-59	128.717	0.0233	100.00	0.0120	0.0000

## **Ubicación de subcuencas en SWMM**

Dentro del marco de esta investigación, se procedió a la meticulosa ubicación de un total de 39 subcuencas en las 4 avenidas de interés, utilizando el programa SWMM como herramienta fundamental. Este proceso de trazado de subcuencas se llevó a cabo teniendo en cuenta tanto las direcciones de flujo como la topografía del terreno, garantizando así una representación precisa de las características hidrológicas de la región de estudio.

En el análisis del sistema hidrológico en cuestión, se evaluaron un total de 62 nodos. De estos, 33 se configuraron como rejillas, 27 como pozos y dos como puntos de salida. Estos nodos cumplen funciones esenciales en la modelización y el estudio de las dinámicas del flujo de agua dentro del sistema, contribuyendo significativamente a la comprensión de su comportamiento.

Además para lograr una representación completa del sistema se incorporaron un total de 60 tramos de tubería en el programa SWMM. Estos tramos de tubería desempeñaron un papel fundamental en la simulación del análisis de los flujos de agua a lo largo del sistema, permitiendo una comprensión exhaustiva de su funcionamiento.



Figura 46. Subcuencas para el Eje 120 en la parte norte de la zona industrial

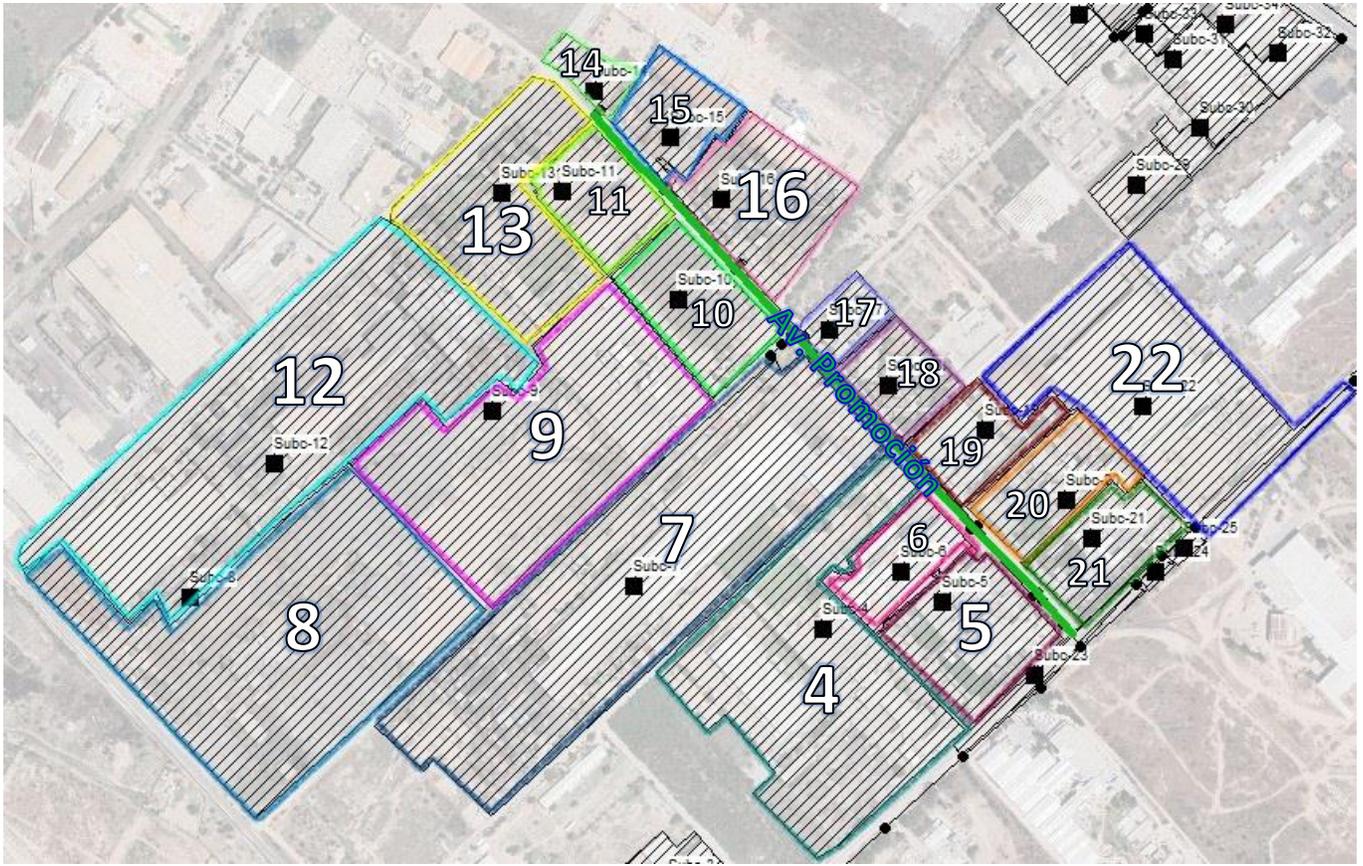


Figura 47. Subcuencas para la Av. Promoción en la parte norte de la zona industrial

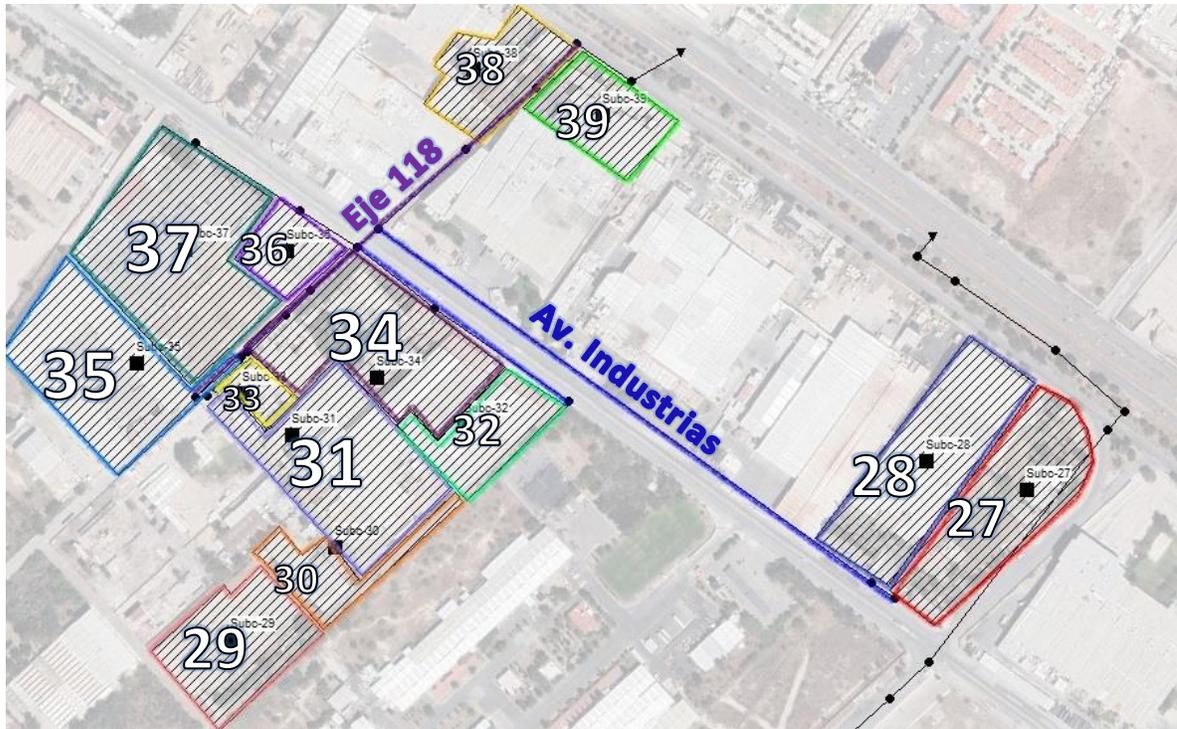


Figura 48. Subcuentas para la Av. Industrias y en el Eje 118 en la parte norte de la zona industrial

### 3.3.2.5 Parámetros hidrológicos utilizados en SWMM

En el programa SWMM se utiliza los siguientes datos

#### **1. Entrada de Datos hidrológicos:**

Curvas I-D-Tr: SWMM utiliza las curvas para obtener información sobre la intensidad de lluvia en función de la duración del evento y la probabilidad de ocurrencia. Estas curvas se utilizan para definir las características de la lluvia en el área de estudio.

Hietograma de Diseño: Los hietogramas de diseño especifican la distribución temporal de la intensidad de la lluvia durante un evento. Estos se utilizan como entrada en SWMM para simular el patrón temporal de la lluvia sobre la cuenca.

#### **2. Simulación hidráulica:**

SWMM utiliza la información proporcionada, incluidos los hietogramas de diseño, para simular cómo fluye el agua a través del sistema de drenaje urbano durante eventos de precipitación.

La modelación hidráulica permite evaluar el rendimiento del sistema, e identificar las posibles áreas, calcular caudales y las velocidades del flujo y determinar cómo responden las infraestructuras a diferentes condiciones climáticas.

#### **3. Diseño y análisis:**

Con la información de los hietogramas de diseño y otros datos hidrológicos, SWMM ayuda en el diseño y análisis de infraestructuras de drenaje. Esto ayuda a ajustar los parámetros del sistema y dimensionar las estructuras para garantizar que se cumplan con los requisitos de manejo de aguas de lluvia.

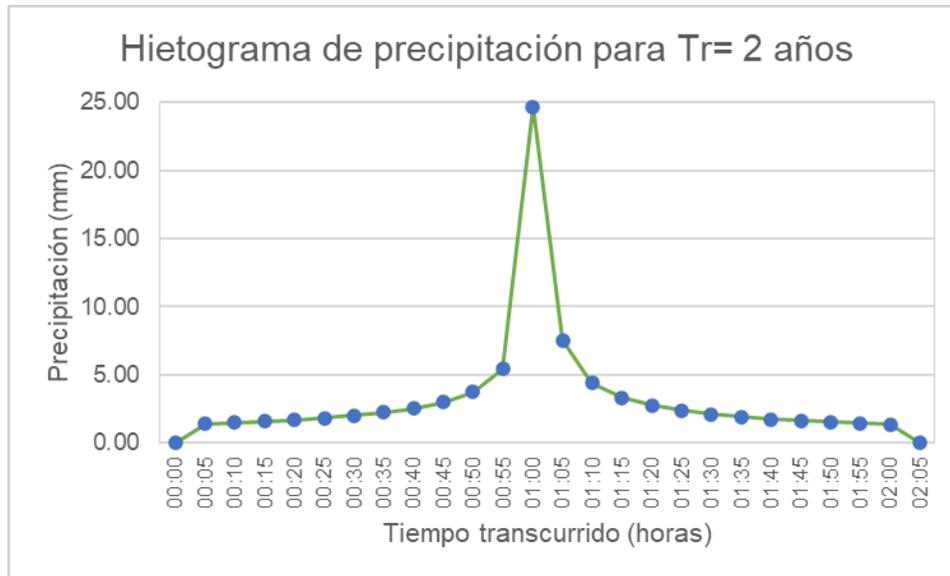


Figura 49. Hietograma de diseño en SWMM

Dentro del proceso de modelado hidrológico en el programa SWMM, es esencial considerar no solo los parámetros hidrológicos a largo plazo, como el hietograma de diseño para un periodo de retorno de 2 años, sino también los parámetros a nivel de intervalos de tiempo más cortos. En este sentido se incorporaron parámetros hidrológicos a intervalos de 5 minutos para obtener una representación detallada y precisa de las dinámicas de escurrimiento.

Estos parámetros a cada 5 minutos incluyen datos de precipitación, tasas de escorrentía superficial, niveles de agua y caudales en distintos puntos del sistema. La recopilación de datos a esta escala de tiempo permite una evaluación minuciosa de cómo las condiciones hidrológicas varían a lo largo de un evento de lluvia y son cruciales para comprender la respuesta del sistema en tiempo real e identificar los posibles problemas de inundación, y tomar decisiones informadas en términos de gestión de aguas pluviales y control de inundaciones.

Time Series Editor

Time Series Name  
Precipitación

Description

Use external data file named below

Enter time series data in the table below

No dates means times are relative to start of simulation.

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
	0:05	1.39
	0:10	1.47
	0:15	1.57
	0:20	1.68
	0:25	1.82
	0:30	2.00
	0:35	2.23
	0:40	2.54
	0:45	2.99
	0:50	3.76
	0:55	5.43

View

OK

Cancel

Help

Figura 50. Parámetros de lluvia utilizados en SWMM

### 3.3.3 Resultados de la escorrentía del sistema de alcantarillado actual

#### 3.3.3.1 Escorrentía urbana

Al hacer la evaluación del sistema de drenaje pluvial actual de la parte norte de la zona industrial de San Luis Potosí, se dividieron en gráficas de acuerdo a su punto de descarga. A continuación, en la figura 50 podemos ver la ubicación de los colectores pluviales.

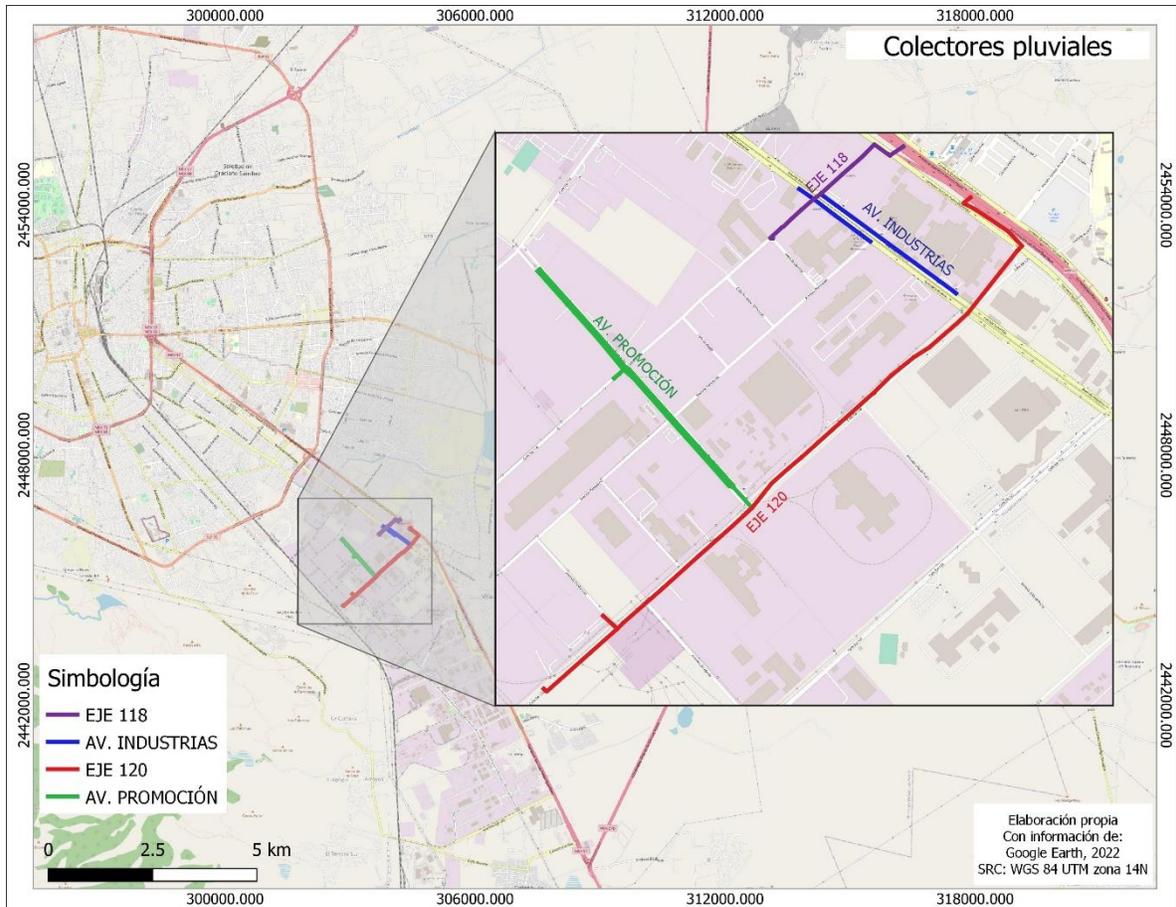


Figura 51. Ubicación del sistema de alcantarillado pluvial actual

Los resultados que arroja el programa SWMM es la escorrentía pico para cada subcuenca y está representada en las unidades de litros por segundo. Se obtuvieron resultados de escorrentía de las 39 subcuencas localizadas en el área de estudio.

En el Eje 120 descargan un total de 8 subcuencas (1,2,3,22,23,24,25,26) y se logra apreciar que la subcuenca número 22 es la que mayor escurrimiento presenta, debido a que es de mayor tamaño a las demás. Se tomarán en cuenta para la propuesta de SUDS que se adecue a las necesidades de las áreas de las 8 subcuencas y se hará la comparación de escurrimientos.

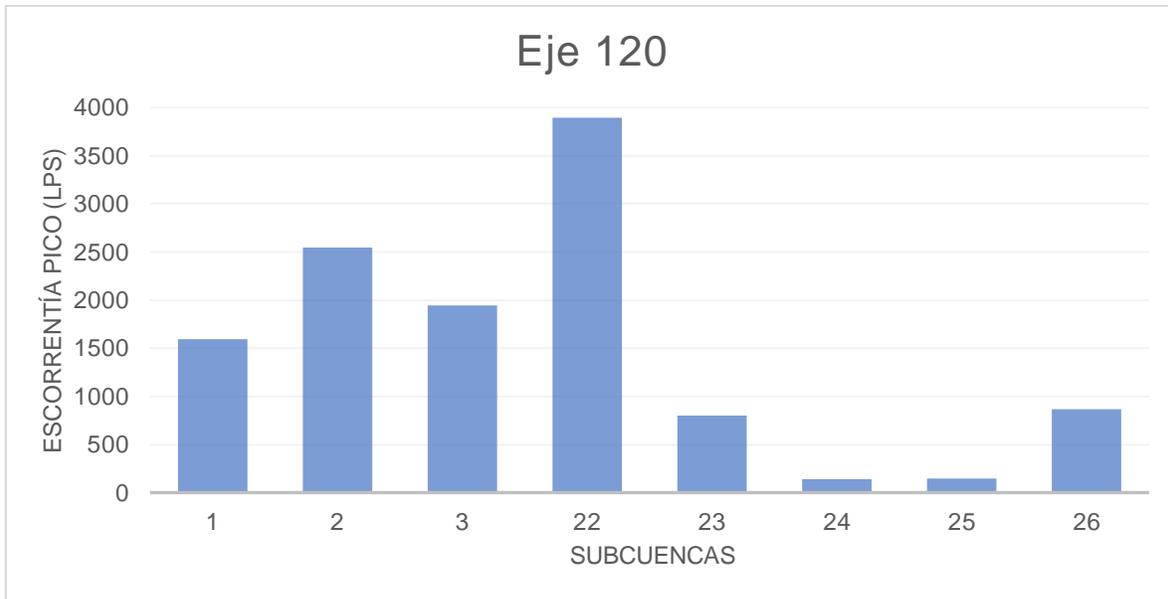


Figura 52. Escurrimiento pico de las subcuencas ubicadas en el Eje 120 de la zona industrial

En la Av. Promoción se encuentran de la subcuencas 4- 21, en donde las subcuencas 12 y 7 presentan la escurrimiento mayor, en este caso también se propondrá el SUDS adecuado para realizar la comparación de escurrimientos en el área de estudio.

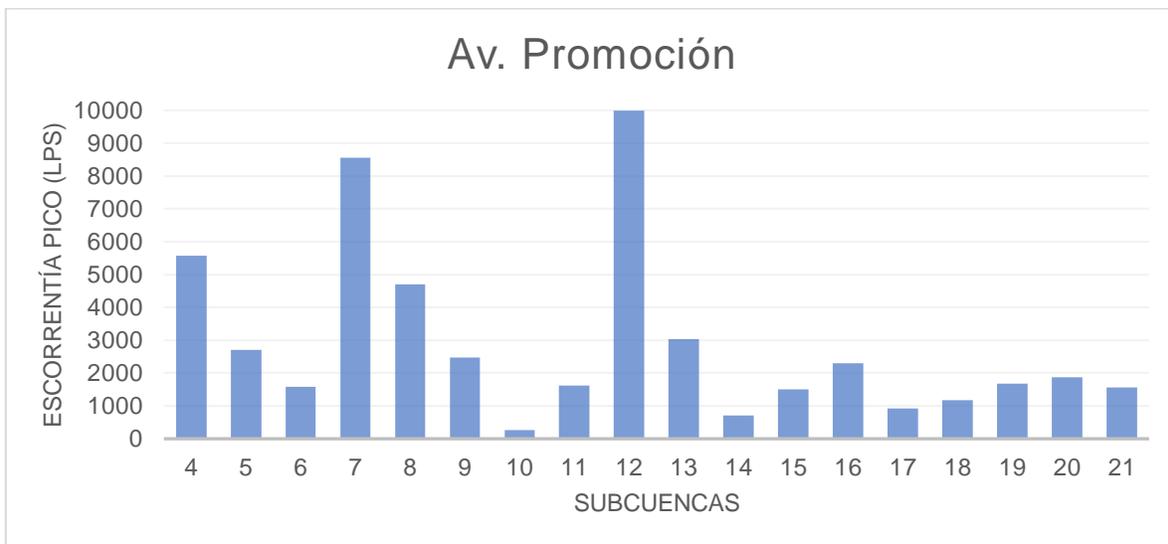


Figura 53. Escurrimiento pico de las subcuencas ubicadas en la Avenida Promoción de la zona industrial

En el eje 118 y Av. Industrias se encuentran las subcuencas con escurrimientos pico más pequeños que en los resultados anteriores, pero también se realizará la propuesta de SUDS adecuado a la zona para la comparación de escurrimientos.

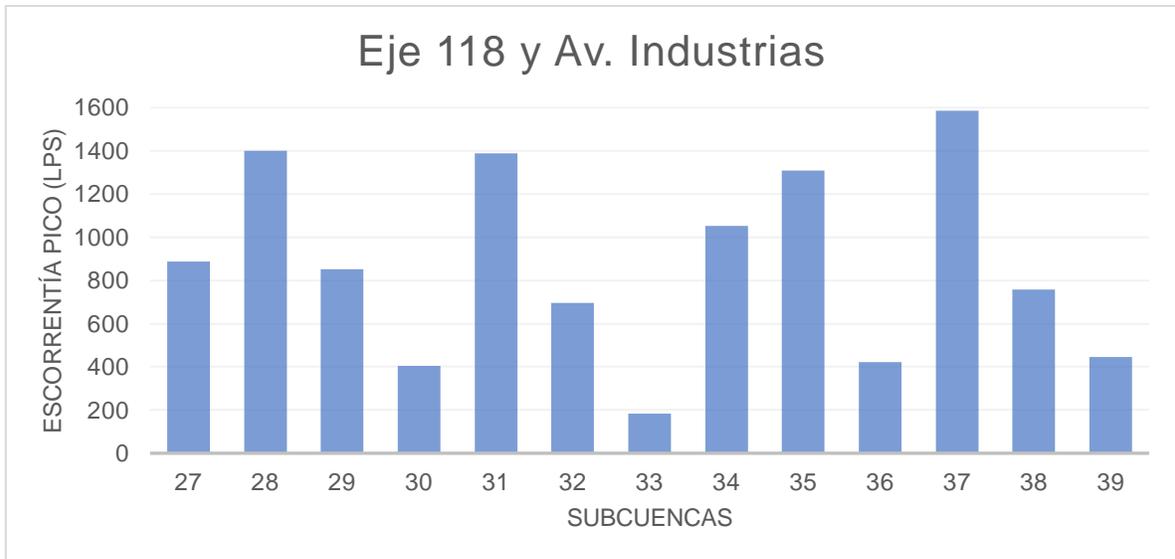


Figura 54. Escorrentía pico de las subcuencas ubicadas en el Eje 118 y Avenida industrias en la zona industrial

### 3.3.3.2 Flujo de colectores

Para los resultados del flujo de colectores están representados por 8 secciones, en donde se obtuvieron flujos mínimos de 200 lps que son los que reciben la menor cantidad de descarga de las subcuencas más pequeñas y flujos máximos de 4864.99 lps que logra que las tuberías trabajen al 100% de su capacidad por un periodo de tiempo prolongado ocasionando grandes escurrimientos en la zona y provocando encharcamientos e inundaciones.

Las 8 secciones representan diferentes tramos en la tubería, en el caso de la Avenida Promoción está conformada por la (S1, S2, S3) que incluyen los tramos de tubería (T-1 al T-19). En la sección 1 hay flujos de 1500 lps a 2300 lps debido a que reciben descargas de las subcuencas 10, 11, 12 y 13.

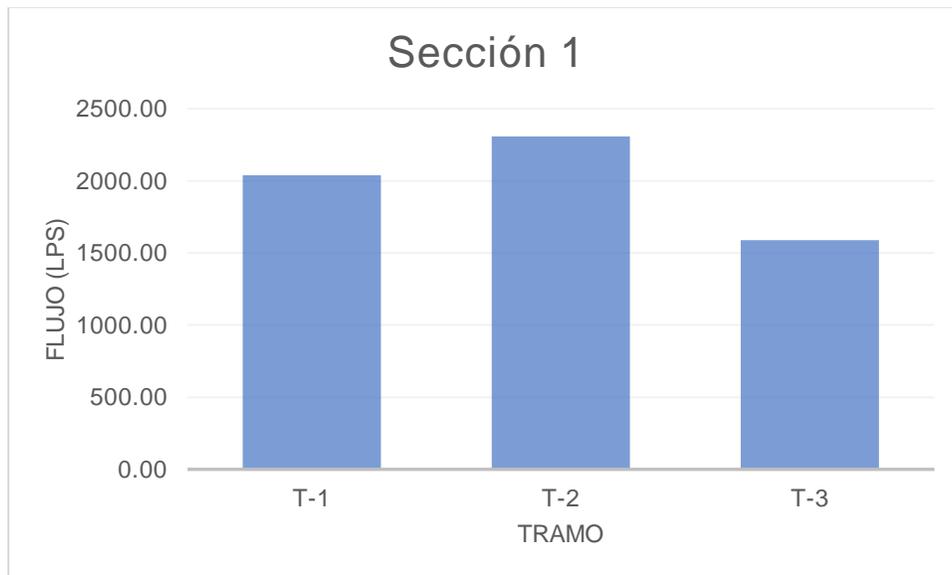


Figura 55. Flujo de colectores Sección 1 en la Avenida Promoción

La sección 2 conformada por los tramos de tubería (T-4 a T19), el flujo máximo que se presenta es de 3221.22 lps y el mínimo es de 756.64 lps (Figura 55) en estos tramos descargan las subcuencas 4-8 en las que se encuentran industrias con gran extensión en m<sup>2</sup>, por lo que se prevé que haya una reducción en el escurrimiento significativa agregando los SUDS.

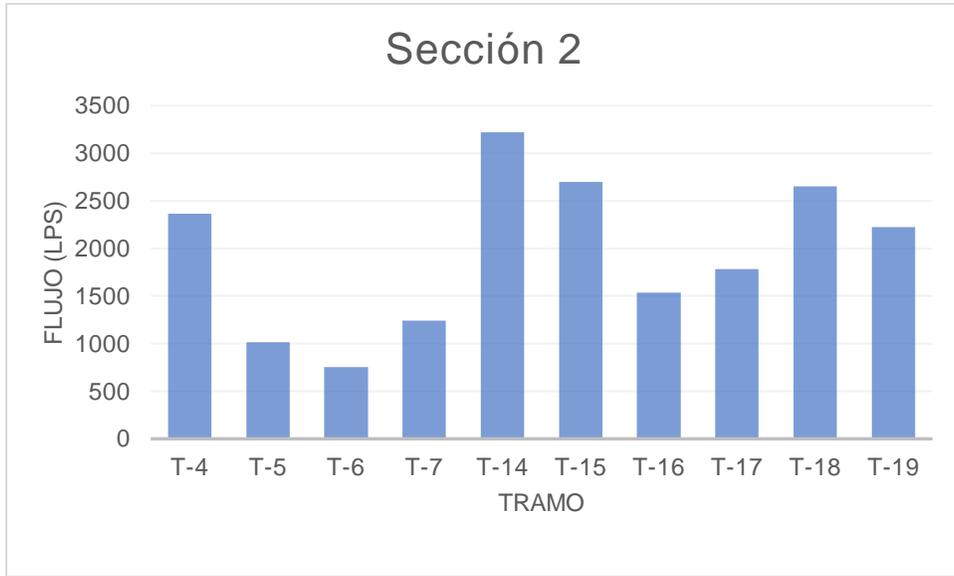


Figura 56. Flujo de colectores Sección 2 en la Avenida Promoción

En la sección 3 que pertenece también a la Av. Promoción en donde se encuentran los tramos 8 a 13 como lo muestra la figura 56, los gastos de esta sección rondan entre los 2100 lps y los 760 lps y se percibe un aumento en el flujo debido a las descargas de las subcuencas 5 y 6.

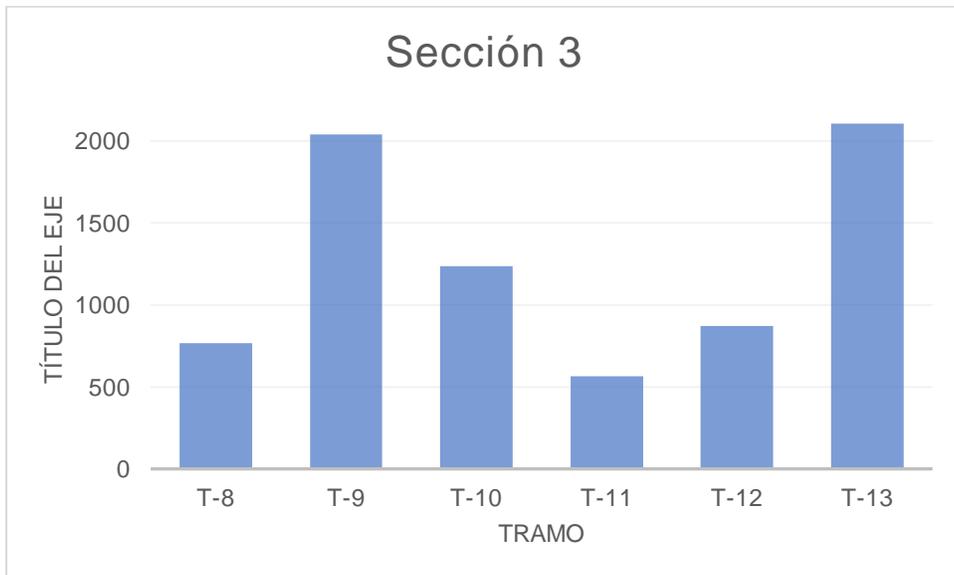


Figura 57. Flujo de colectores Sección 3 en la Avenida Promoción

La sección 4 es una de las ramificaciones del Eje 20 está conformada por los tramos 20 y 21 que reciben el gasto de las subcuencas 1 y 2 que, si bien no son de las más extensas, son las subcuencas que más del 90% de sus áreas está urbanizado y sus escurrimientos son mayores (Figura 57).

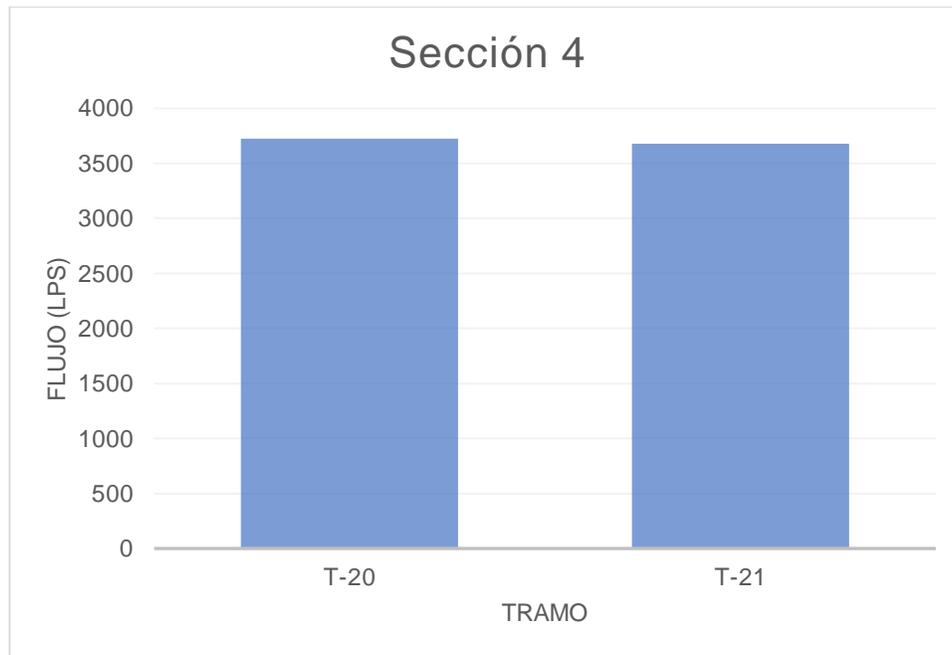


Figura 58. Flujo de colectores Sección 4 en el Eje 120

La sección 5 es de las secciones más grandes del proyecto, tiene un total de 21 tramos (T-22 al T-42) en donde descargan las subcuencas 1,2,3,22,23,24 y 26, el caudal máximo que se presenta en esta sección es de 4864.99 lps esto es debido a que en este tramo se une el caudal de la sección 4 (Figura 58), los demás tramos se mantienen en promedio de 2000 lps.

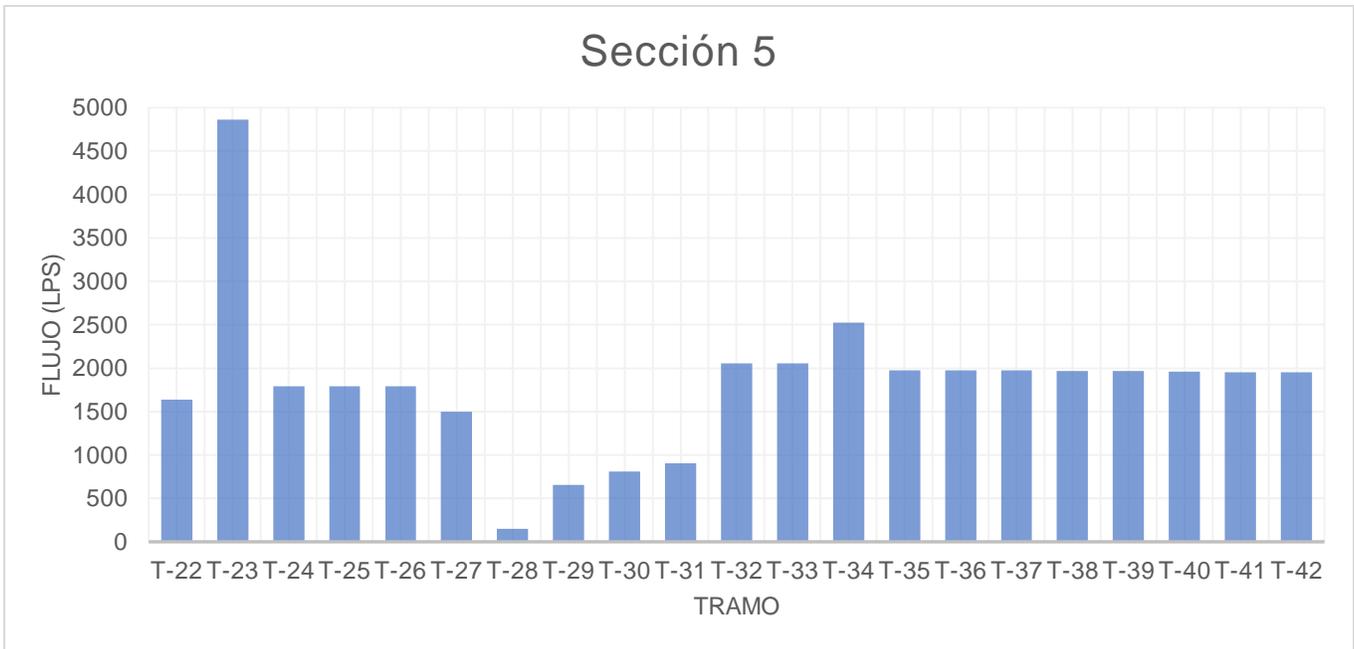


Figura 59. Flujo de colectores Sección 5 en el Eje 120

En la sección 6 de la Av. Industrias se presenta un pico en el tramo 51 (Figura 59), que corresponde al punto donde se conecta la subcuenca 34 y se conecta con los tramos anteriores.

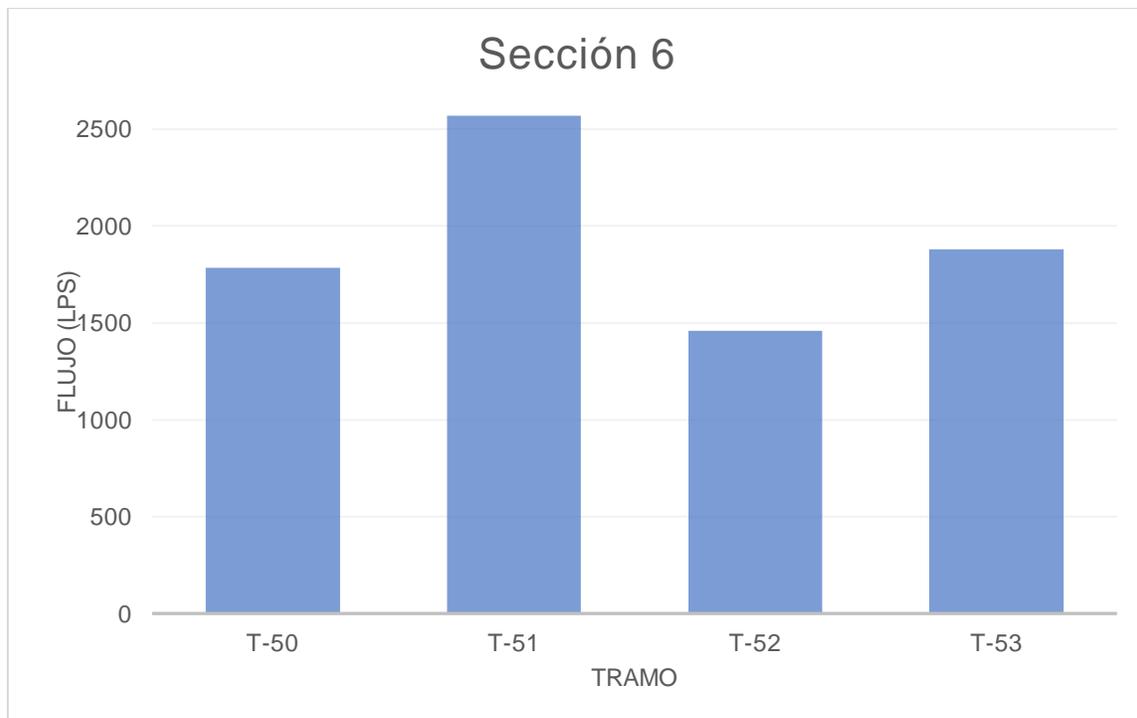


Figura 60. Flujo de Colectores Sección 6 en la Avenida Industrias

La sección 7 de la Avenida Industrias, presenta su mayor caudal en el tramo 55 porque descarga la subcuenca 28 y este tramo está conectado al tramo 54 donde descarga la subcuenca 27 por lo tanto el caudal es prácticamente el doble.

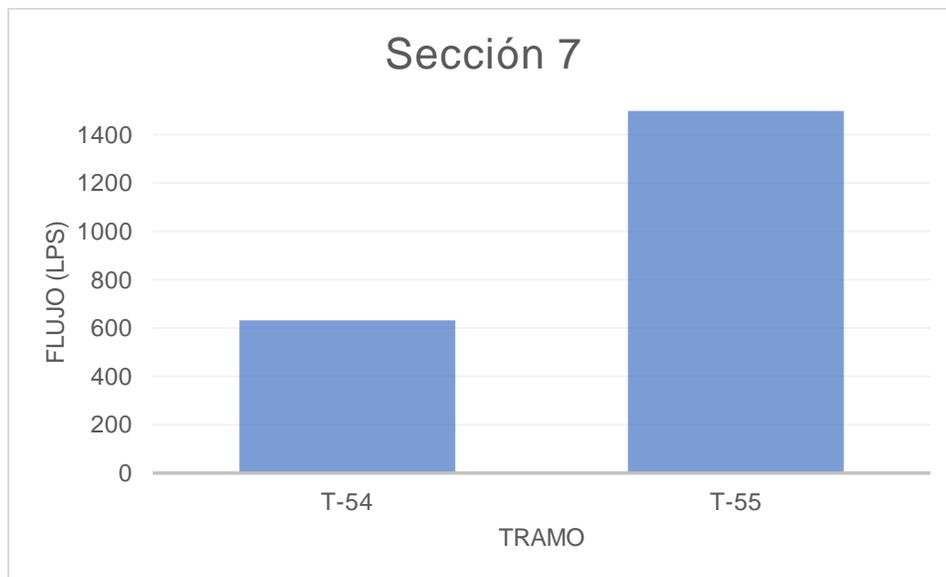


Figura 61. Flujo de Colectores Sección 7 en la Avenida Industrias

En la última sección en el eje 118 tiene los tramos T-43 al T-49 y el T-56 al T-60 se observa un pico en los tramos T-59 y T-60 esto es debido a que 2 subcuencas descargan en esos puntos y se conectan con los otros tramos.

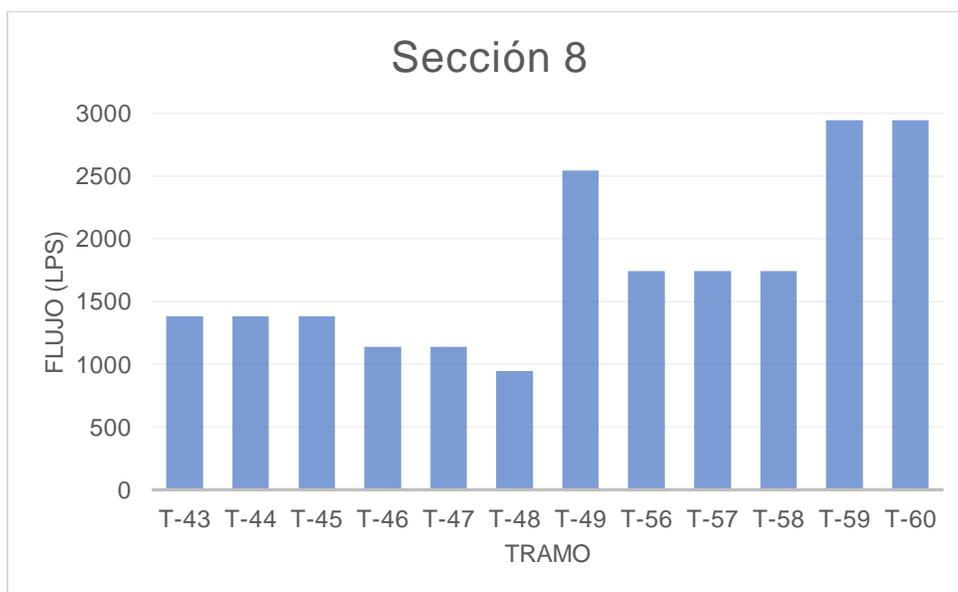


Figura 62. Flujo de Colectores Sección 8 en el Eje 118.

## CAPÍTULO 4. Propuesta de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y la evaluación del impacto en el escurrimiento de las aguas pluviales mediante Storm Water Management Model (SWMM).

### 4.1 Análisis para la selección de SUDS

Para la selección de SUDS adecuado de acuerdo a la zona se propone una metodología para orientar la aplicación de los SUDS a tres escalas espaciales (1) CIUDAD, (2) LOCAL y (3) MICROESCALA. Este planteamiento pretende seleccionar una ubicación y unos sistemas de acuerdo con las necesidades de la cuenca. En la siguiente tabla se describe la metodología propuesta resumiendo las principales actividades de cada etapa, la información necesaria y los resultados esperados (Jimenez et al., 2019).

Tabla 16. Metodología multiescala para la planificación de sistemas urbanos de drenaje sostenible

Paso		Actividades principales	Información requerida		Resultados		
CIUDAD	1	Definir objetivos, marco de planeación y normatividad local	Realizar talleres	Normativa local		Objetivos y limitantes del proyecto	
	2	Identificar subcuencas prioritarias y estratégicas	Definir unidades de manejo de drenaje	Subcuencas urbanas		Análisis espacial unitario	
			Realizar análisis espacial	Calidad del agua	Ríos	Índice de calidad de agua	Subcuenca prioritaria
					Humedales		
					Otros cuerpos de agua		
				Cantidad de agua	Llanuras de inundación	Índice de cantidad del agua	
					Capacidad del sistema pluvial		
					Zona de encharcamiento		
			Información social y ambiental	Puntos críticos	Índice social y ambiental		
	Calidad del aire						
Parques							
Arboles							
Edificios	Índice de corredores verdes-azules	Subcuenca prioritaria					
Población vulnerable							
Nivel socioeconómico							
Corredores verdes		Corredores verdes-azules					

				Desarrollo urbano y planes de desarrollo	Índice de planeación	
LOCAL	3	Identificar áreas para SUDS, viabilidad y potenciales restricciones		Restricciones físicas por SUDS	Áreas potenciales para SUDS	
				Uso de suelo		
				Pendientes		
				Nivel de agua subterránea		
				Tasa de infiltración (geología o datos geotécnicos)		
				Edificios		
				Lotes		
Espacios Públicos						
MICRO	4	Selección de tipos de SUDS y líneas de su tratamiento para un área propuesta	Uso de matrices de selección	SUDS factibles por área	SUDS recomendados	

Para este proyecto, se llevó a cabo el procedimiento a microescala, debido al tamaño de la zona de estudio, que no permite considerarla como una localidad completa debido a la extensión del área. Se realizaron las etapas de selección de sitio, selección de SUDS y selección de trenes de tratamiento.

### Selección de sitio

En cuanto a la selección del sitio, se identifica como el escenario óptimo cuando una subcuenca de drenaje urbano ha sido previamente definida como prioritaria y estratégica, y además existe espacio disponible. En este contexto, se evaluó cada subcuenca de drenaje urbano asignando puntuaciones según los criterios de prioridad estratégica. Posteriormente, con base en la disponibilidad de espacio, se eligieron áreas específicas para la implementación de SUDS.

### Selección de SUDS

La selección de SUDS dependió de su rendimiento en relación con múltiples aspectos. Por lo tanto, se definió una matriz cualitativa para comparar los tipos de SUDS factibles en un área. Esta matriz contiene criterios relacionados con la mejora de la calidad del agua pluvial, reducción de volumen de agua pluvial, mantenimiento y costos. Para cada criterio, se definieron tres niveles: alto, medio y bajo. En el caso de la mejora de la calidad, alto significa más del 80% de reducción de carga contaminante, moderado indica entre el 30% y el 80% de reducción de carga

contaminante, y bajo corresponde a menos de 30% de reducción de carga contaminante y bajo corresponde a menos del 30% de reducción de carga contaminante. La Tabla 17 presenta los niveles definidos correspondientes a las características de los diferentes tipos de SUDS e información reportada en la literatura.

Tabla 17. Calificación según la eficiencia en la eliminación de contaminantes y procesos relevantes

	Mejora de la calidad			Control de escorrentía			Amenidad	Mantenimiento	Costo						
	Nutrientes	Metales	Bacterias	Sedimentos	Aceite y grasa	Basura y residuos	Filtración y sorción	Control de volumen	Control de descarga	Mejora en la percepción	Interferencia con actividades en el sitio	Riesgos de seguridad	Actividades y riesgo de obstrucción	Costo de capital	Costo y mantenimiento
Zanja de infiltración	M	M	L	M	M	M	L	L	L	M	H	H	L	L	L
Barril de lluvia y cisterna	N	N	N	N	N	N	N	M	M	N	L	L	L	M	M
Zona de biorretención	M	H	M	M	H	H	H	M	L	H	H	M	M	M	M
Caja de arbórea	M	M	M	M	H	H	M	L	L	M	L	L	M	M	M
Cuenca de retención en seco extendido	L	M	M	M	M	H	L	L	M	H	M	M	M	M	M
Zanja de infiltración	M	H	H	H	M	H	H	H	H	N	M	M	H	M	M
Pavimento permeable	L	M	M	H	H	M	M	H	M	N	L	L	M	H	H
Estanque húmedo	M	M	M	M	M	H	L	L	H	H	H	H	M	H	M
Filtro de arena	M	M	M	H	M	H	H	L	L	L	M	M	H	M	H
Humedal artificial	M	M	M	H	H	H	M	L	H	H	H	H	H	H	M
Sumidero	L	L	L	H	L	L	M	H	M	N	L	L	M	M	M
Cuenca de infiltración	M	H	H	H	M	H	M	H	M	H	M	M	H	M	H
Techo verde	L	L	L	L	L	L	L	H	M	M	L	L	M	H	L

Para identificar el tipo de SUDS se evaluó de acuerdo a la literatura según sus características y los procesos de control de agua pluvial (tabla 18). De esta manera los que cuentan con puntuación más alta son aquellos recomendados.

Tabla 18. Puntuación asignada a los procesos evaluados de (0 a 5)

Tipos de SUDS	Infiltración	Detención	Conducción	Cosecha de agua de lluvia	Riego
Zanja de infiltración	2	1	5	0	0
Barril de lluvia y cisterna	0	4	0	5	5
Zona de biorretención	3	4	0	0	4
Caja de arbórea	3	4	0	0	4
Cuenca de retención en seco extendido	3	5	0	1	1
Zanja de infiltración	5	3	3	0	0
Pavimento permeable	5	3	0	0	0
Estanque húmedo	0	5	0	0	0
Filtro de arena	3	4	0	0	0
Humedal artificial	0	5	0	0	3
Sumidero	5	3	0	0	0
Cuenca de infiltración	5	5	0	0	0
Techo verde	0	3	0	0	4

## 4.2 Selección de SUDS en la zona de estudio

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la propuesta de SUDS en la zona de estudio se llevó a cabo mediante un análisis detallado de la disponibilidad del terreno en cada subcuenca. Se evaluó la existencia de áreas propicias para la incorporación de SUDS, y en primera instancia, se formuló una propuesta general para la zona, teniendo en cuenta las características específicas de cada subcuenca, como se ilustra en la figura 62.

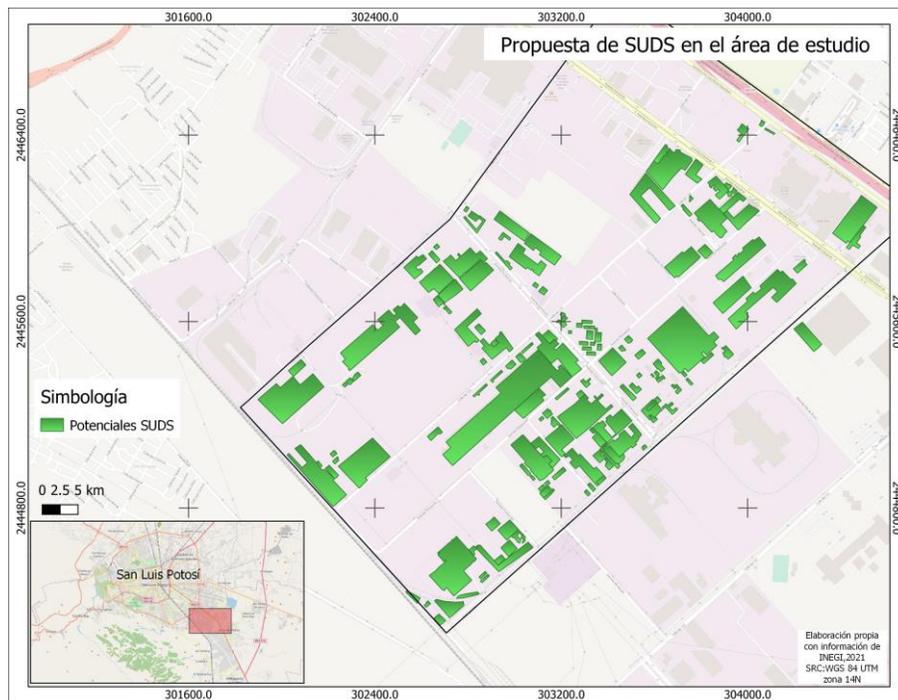


Figura 63. Propuesta de SUDS en el área de estudio

Con base en las pendientes de la zona y el diseño actual del sistema de alcantarillado pluvial, se procedió a seleccionar las subcuencas donde la incorporación de SUDS será factible. Posteriormente, se consideró la eficiencia de los SUDS, como se detalla en la tabla 18, en consonancia con los objetivos fundamentales de este proyecto, que consisten en reducir la escorrentía en el sistema de alcantarillado pluvial y almacenar el agua de lluvia.

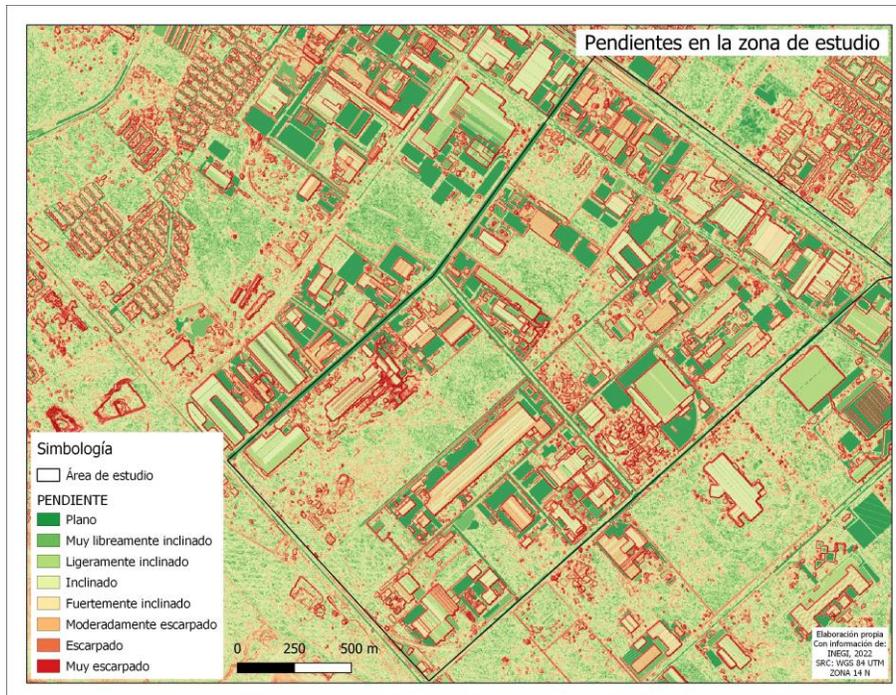


Figura 64. Pendientes en la zona de estudio

La selección final de los SUDS se realizó teniendo en cuenta la idoneidad para la zona. Para este proyecto, se propuso asignar el 13.28% del área total de 3,570,000 m<sup>2</sup> a SCALL's, lo que representa 474,154,114 m<sup>2</sup>. Los pavimentos permeables abarcarían el 2.93% del área total, equivale a 104,503 m<sup>2</sup>, mientras que el 1.033% se destinarán a cuencas de retención, cubriendo un área de 36,904 m<sup>2</sup>.

Dado que la zona de estudio se encuentra ubicada en la parte norte de la zona industrial y una parte significativa del área de cada subcuenca está ocupada por instalaciones industriales, los SCALL's prevalecen como la opción predominante.

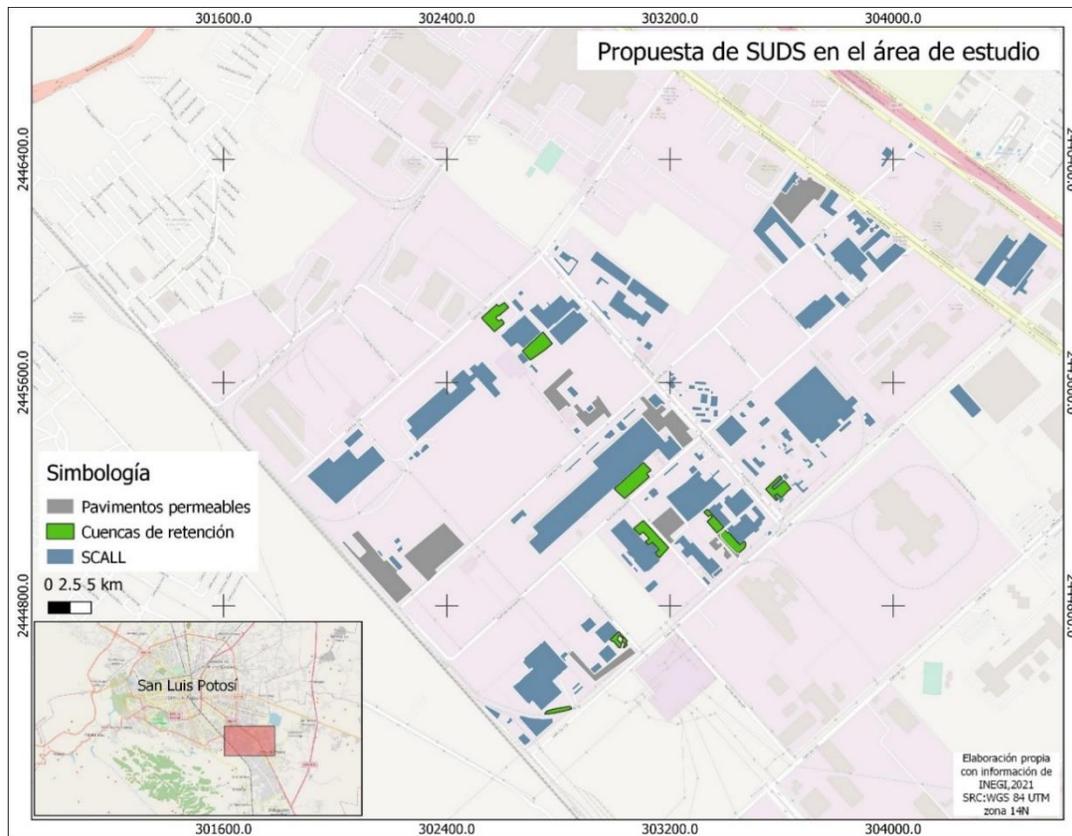


Figura 65. Propuesta de SUDS en el área de estudio (Pavimentos permeables, Cuencas de retención y SCALLS).

### 4.3 Diseño de SUDS

#### 4.3.1 Pavimentos permeables

Para los pavimentos permeables se tomaron las siguientes especificaciones:

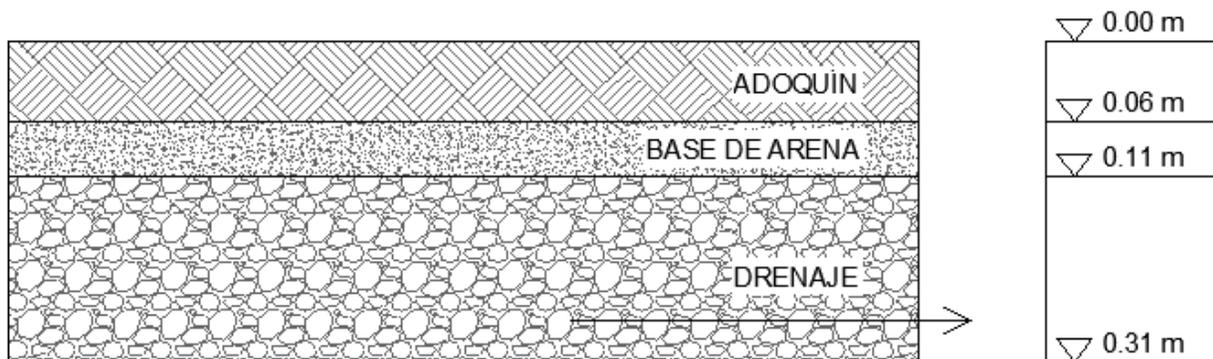


Figura 66. Corte del pavimento permeable

### 4.3.2 Cuenca de retención

A continuación, en las siguientes tablas se mostrarán las características de las cuencas de retención para los sistemas propuestos.

Característica	Valor	Detalles
Área tributaria (A)	36,904 m <sup>2</sup>	Área correspondiente a la cubierta de asbesto cemento
Profundidad de lluvia de diseño (hp)	21.53mm	Obtenida de los resultados de la investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones (CIIA, 2017)
Volumen de tratamiento (Vc)	794.54 m <sup>3</sup>	De acuerdo al área tributaria, el coeficiente de escorrentía y la profundidad de la lluvia de diseño basada en el estudio hidrológico.
Coefficiente de escorrentía (C)	0.85	De acuerdo a la Norma Técnica NS 085 de la EAAB
Área mínima sup (A <sub>min</sub> )	1.5m <sup>2</sup>	De acuerdo con el manual de diseño de drenaje pluvial (CONAGUA, 2021)
Área superficial de la zona de bio- retención	3405.97 m <sup>2</sup>	Asumiendo que las paredes son verticales para el piloto del sistema de drenaje
Lámina inundable (d)	0.2m	Máximo 0.3 m de acuerdo con el manual de diseño de drenaje pluvial (CONAGUA, 2021).
Profundidad del sustrato	0.5m	Mínimo 0.46 m. Se utiliza 0.5, para contener el volumen de calidad.
Sustrato	Suelo y materia orgánica (3-5 % del peso)	Suelo: 80% - 90%: Arena 3% - 17%: Limo 3% - 17%: Arcilla
Capa de separación	0.05 m de espesor	Gravilla fina
Tubería de drenaje	4" – 6 "de diámetro	Orificio de tubería 3/8"
Capa de drenaje	0.20m	De acuerdo con las recomendaciones de la norma técnica- Criterios para diseño y construcción de SUDS.

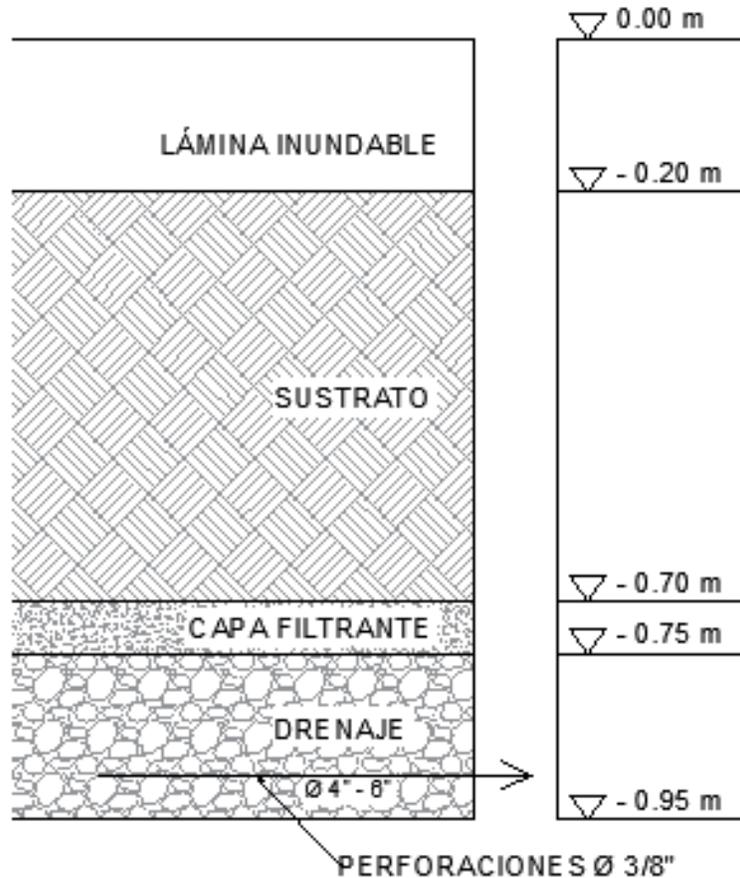


Figura 67. Corte de la cuenca de retención. Elaboración propia

#### 4.3.3 Sistemas de captación de agua de lluvia

**1. Delineación de Techos de Industrias:** Inicialmente se utilizó el programa QGIS en conjunto con la opción de visualización de imágenes de Google Satélite para trazar con precisión los contornos de los techos de las industrias ubicados en las 39 subcuencas de interés. Esta fase permitió identificar las áreas de captación potencial de agua de lluvia en cada industria.

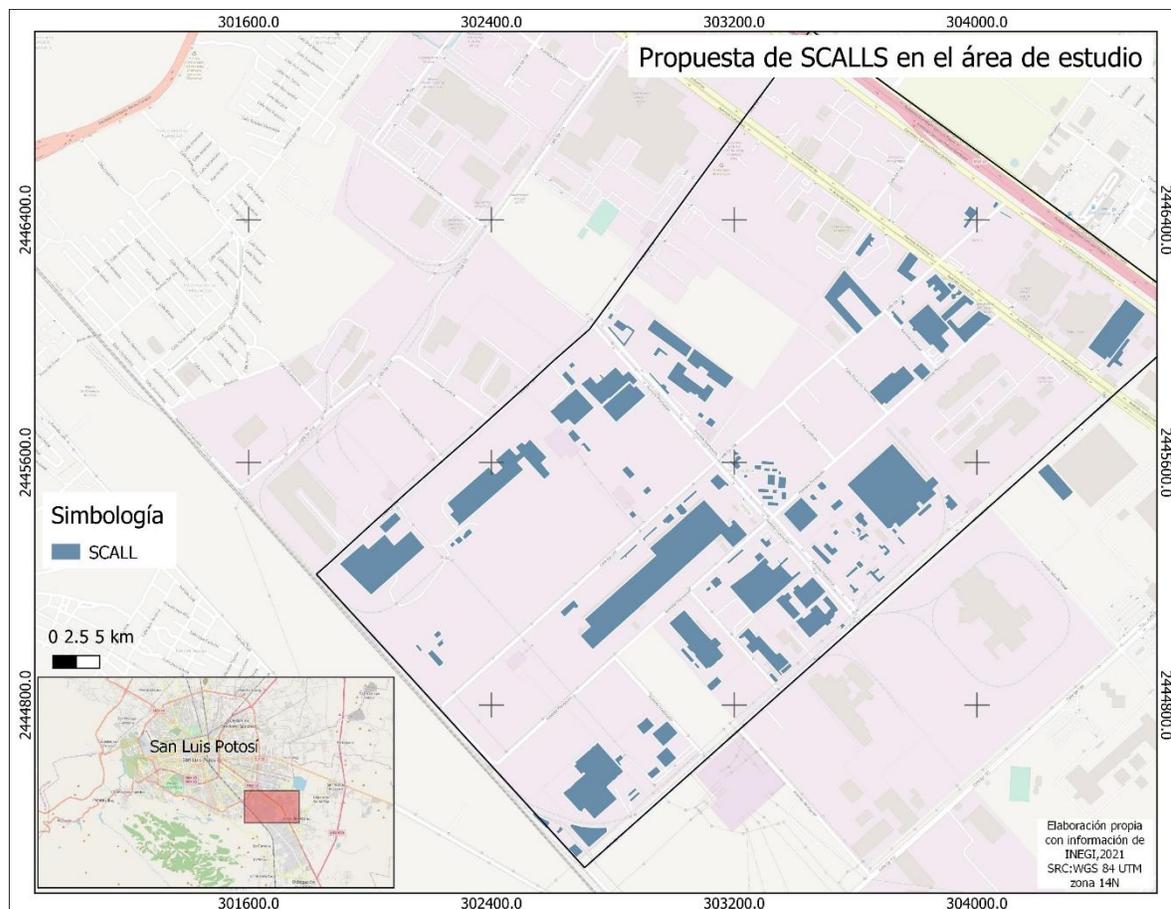


Figura 68. Sistemas de captación de agua de lluvia en la zona de estudio

**2. Tabla de propiedades de SCALL's:** Se creó una tabla de propiedades que contenía información detallada sobre las áreas exactas de cada SCALL's y el porcentaje del área total de la subcuenca que abarcaba cada uno, para estimar del potencial de recolección de agua de lluvia en cada SCALL's.

**3. Inspección en Google Street View:** Se realizó una inspección minuciosa de cada industria utilizando Google Street View de Google Earth. Esta vista detallada permitió apreciar el grosor de los techos de las industrias, en su mayoría compuestos por láminas, con el fin de calcular la cantidad de metros cúbicos ( $m^3$ ) de agua que podían retener. Además, se identificaron los nodos de descarga de agua de lluvia en relación con la topografía del terreno circundante como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. *Propiedades de los SCALL's en las subcuencas*

Subcuenca	Área total (m <sup>2</sup> )	Áreas SCALL's (m <sup>2</sup> )	% SCALL's	Almacenamiento (m <sup>3</sup> )	Nodo descarga
1	26800	7610.975	28.3991604	426.2146	N-20
2	55500	27941.029	50.3441964	1564.69762	N-20
3	42800	9870.25	23.0613318	552.734	N-22
4	141600	29371.542	20.7426144	1644.80635	N-6
5	45700	18640.813	40.7895252	1043.88553	N-8
6	25400	21348.922	84.050874	1195.53963	N-7
7	214200	73607.586	34.3639524	4122.02482	N-6
8	185400	2417.825	1.30411273	135.3982	N-19
9	142300	1973.829	1.38708995	110.534424	N-18
11	29500	19481.133	66.037739	1090.94345	N-2
12	208100	62227.725	29.9027991	3484.7526	N-1
13	73800	12727.013	17.2452751	712.712728	N-1
14	9200	2883.438	31.3417174	161.472528	N-9
15	25900	7465.25	28.8233591	418.054	N-10
16	48200	17547.387	36.4053672	982.653672	N-11
17	12300	1267.963	10.3086423	304.31112	N-12
18	22400	6201.131	27.6836205	347.263336	N-13
19	25100	9070.687	36.1381952	2176.96488	N-13
20	30700	5109.807	16.6443225	1226.35368	N-14
21	31500	3484.168	11.0608508	195.113408	N-15
22	115900	47873.191	41.3056005	2680.8987	N-32
26	12200	6012.447	49.2823525	336.697032	N-34
27	20300	2440.543	12.0223793	136.670408	N-54
28	21000	16856.379	80.2684714	1176	N-55
29	14000	9488.368	67.7740571	531.348608	N-50
30	6800	1952.113	28.7075441	109.318328	N-50
31	23000	12658.182	55.0355739	708.858192	N-43
32	9100	6723.102	73.8802418	376.493712	N-50
33	2600	233.259	8.9715	55.98216	N-46
34	23300	8429.672	36.1788498	674.37376	N-51
35	21100	13058.809	61.89009	731.293304	N-46
36	5600	3754.383	67.0425536	450.52596	N-52
37	29200	2115.32	7.24424658	253.8384	N-53
38	10500	2007.971	19.1235333	481.91304	N-59
39	9700	301.836	3.11171134	72.44064	N-59

**4. Diseño de almacenamiento personalizado:** Basándose en el volumen estimado de m<sup>3</sup> de agua que podía ser retenido por cada industria, se propuso un sistema de almacenamiento para satisfacer las necesidades individuales.

**5. Opciones de almacenamiento:** Se definieron un total de 9 opciones de almacenamiento con capacidades de 10 m<sup>3</sup>, 1 de 20 m<sup>3</sup>, 1 de 25 m<sup>3</sup>, 1 de 30 m<sup>3</sup>, 3 de 35 m<sup>3</sup>, 2 de 40 m<sup>3</sup>, 32 de 65 m<sup>3</sup>, 16 de 313 m<sup>3</sup> y 19 de 1569 m<sup>3</sup>, tal como se presenta en la Tabla 20. Estas opciones se seleccionaron en función de las características de las industrias y su capacidad de retención de agua.

Tabla 20. *Propiedades de los tanques utilizados*

Tanque (m <sup>3</sup> )	Diametro (m)	Radio (m)	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )
10	3.00	1.50	2.40	7.07
20	2.42	1.21	5.06	4.60
25	3.50	1.75	3.90	9.62
30	2.77	1.39	5.61	6.03
35	3.40	1.70	4.75	9.08
40	3.24	1.62	5.55	8.24
65	3.50	1.75	7.59	9.62
313	7.25	3.63	7.57	41.28
1569	15.94	7.97	7.86	199.56

**6. Almacenamiento en SWMM:** Se ingresaron las propiedades específicas de cada una de las opciones de almacenamiento en el programa SWMM (Figura 61).

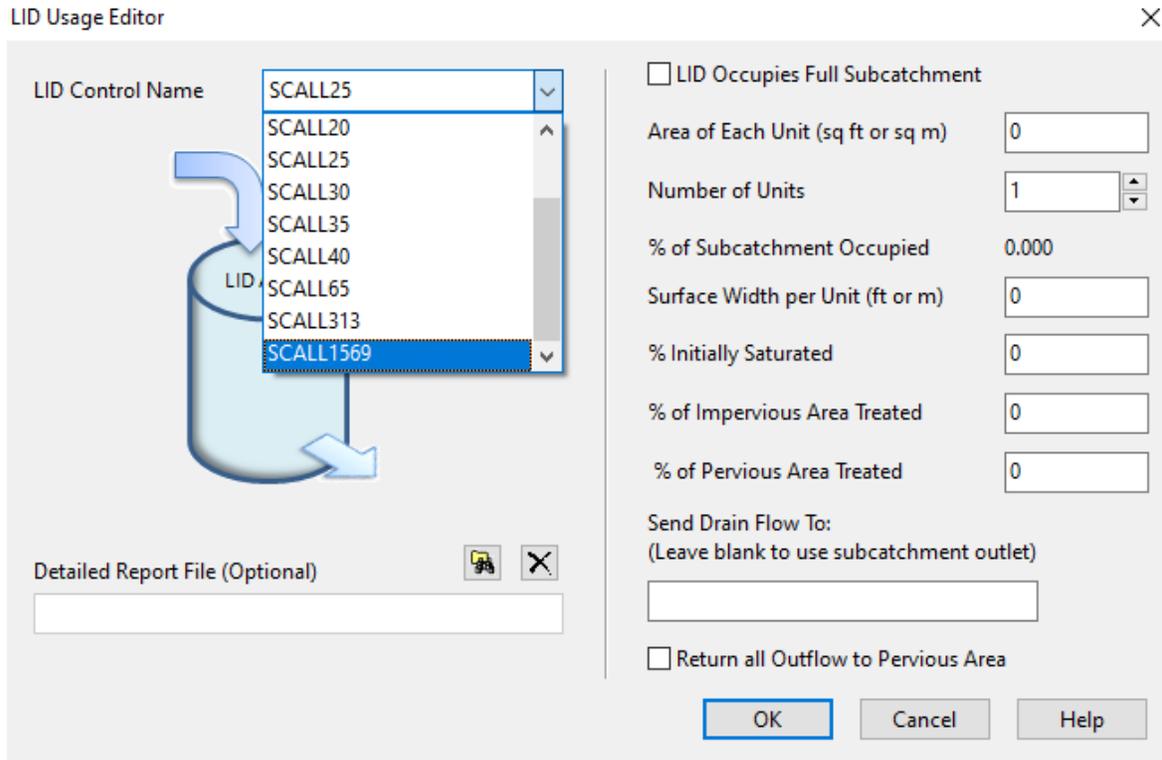


Figura 69. Ejemplo del almacenamiento en SWMM

**7. Cálculo de los Tanques SCALL´s:** Finalmente, se procedió al cálculo y diseño de los tanques SCALL´s específicos. Esto resultó en la creación de 6 tanques de 10 m<sup>3</sup>, 1 tanque de 20 m<sup>3</sup>, 1 tanque de 25 m<sup>3</sup>, 1 tanque de 30 m<sup>3</sup>, 3 tanques de 35 m<sup>3</sup>, 2 tanques de 40 m<sup>3</sup>, 32 tanques de 65 m<sup>3</sup>, 16 tanques de 313 m<sup>3</sup> y 19 tanques de 1569 m<sup>3</sup>, como se detalla en la Tabla 21.

Tabla 21. Cantidad y tipo de tanques de almacenamiento usados

Tanque	Cantidad
10 m <sup>3</sup>	6
20 m <sup>3</sup>	1
25 m <sup>3</sup>	1
30 m <sup>3</sup>	1
35 m <sup>3</sup>	3
40 m <sup>3</sup>	2
65m <sup>3</sup>	32
313 m <sup>3</sup>	16
1569 m <sup>3</sup>	19

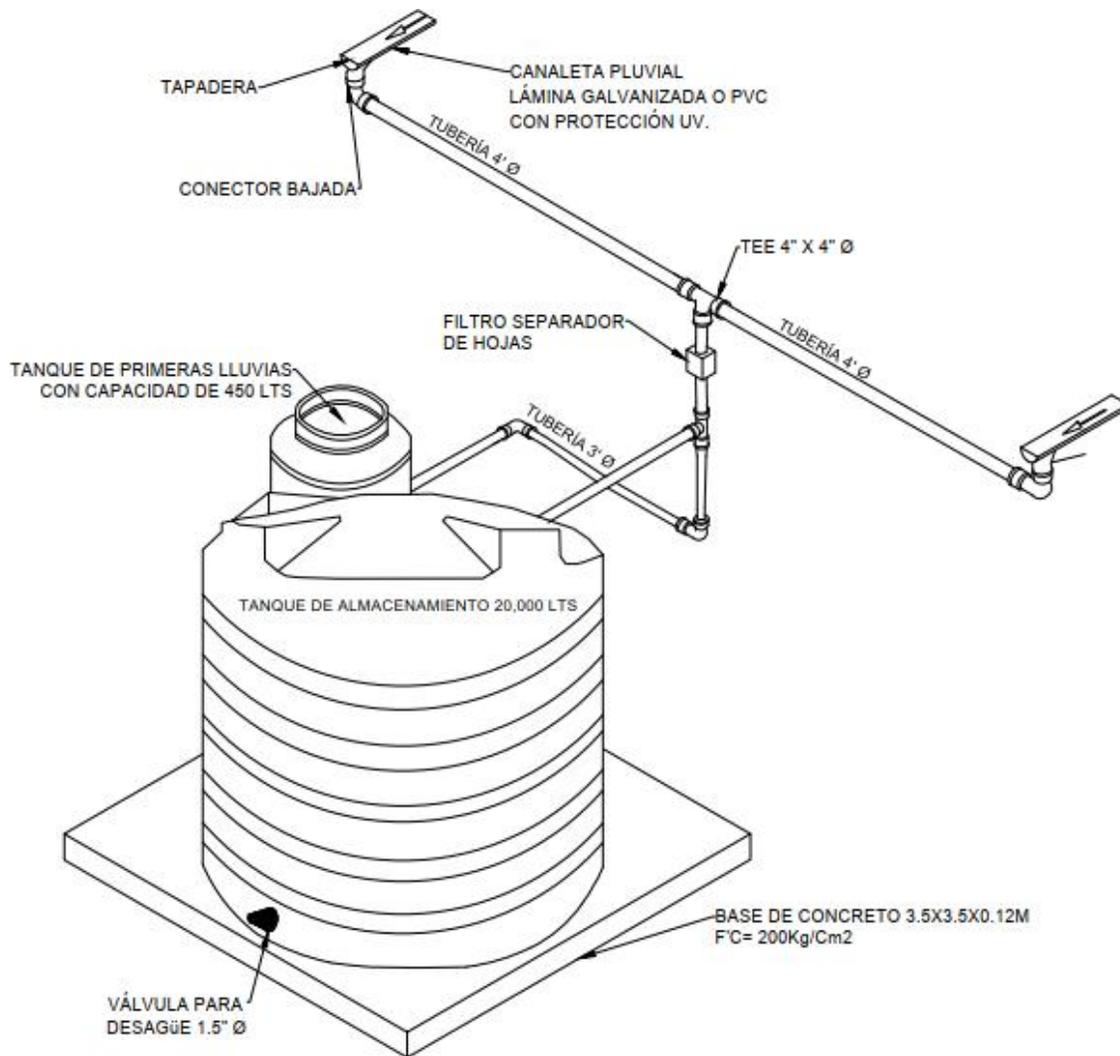


Figura 70. Isométrico de instalación de captación de agua de lluvia

## 4.4 Modelación del sistema de alcantarillado pluvial actual considerando los SUDS

### 4.4.1 Integración de los SUDS al programa

El “LID Control” en el programa SWMM se refiere a las prácticas de manejo de aguas pluviales basadas en el uso de dispositivos y técnicas llamadas “Low Impact Development” (Desarrollo de Bajo Impacto) o LID.

El control LID en SWMM se utiliza para simular la implementación de prácticas de desarrollo de bajo impacto en una cuenca o área urbana. Estas prácticas están diseñadas para reducir el impacto negativo de la urbanización en el ciclo natural del agua y minimizar la contaminación del agua de escorrentía. Algunos ejemplos de prácticas LID incluyen:

1. Techos verdes: La instalación de vegetación en los techos de los edificios para absorber agua de lluvia y reducir la escorrentía.
2. Pavimentos permeables: El uso de pavimentos permeables para permitir que el agua se filtre en el suelo en lugar de convertirse en escorrentía.
3. Jardines de lluvia: La creación de áreas ajardinadas que capturan y tratan el agua de lluvia antes de que ingrese al sistema de drenaje.
4. Cunetas verdes: El uso de vegetación en cunetas y zanjas para reducir la velocidad de escorrentía y mejorar la calidad del agua.
5. Captación de aguas pluviales: La recolección y reutilización del agua de lluvia para usos como riego o inodoros.

En el proceso de incorporación de los SUDS en el programa SWMM, se deben introducir los datos correspondientes en las propiedades de cada subcuenca, como se ilustra en la Figura 70.

Subcatchment Subc-3	
Property	Value
Name	Subc-3
X-Coordinate	302948.515
Y-Coordinate	2444694.790
Description	
Tag	
Rain Gage	Pluv-1
Outlet	N-22
Area	4.28
Width	206.346
% Slope	0.1405
% Imperv	94.39
N-Imperv	0.0110
N-Perv	0.1300
Dstore-Imperv	0.05
Dstore-Perv	0.05
%Zero-Imperv	25
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	3
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
N-Perv Pattern	
User-assigned name of subcatchment	

Figura 71. Propiedades de las subcuencas

Los parámetros mostrados en la figura 71 son los mismos para los SCALL's, pavimentos permeables y cuencas de retención, e incluyen los siguientes:

- Área de cada unidad (Area of Each Unit): Este parámetro se refiere al tamaño de cada unidad de SUDS en m<sup>2</sup>
- Número de unidades (Number of Units): Indica la cantidad de unidades de SUDS que están implementadas en cada subcuenca específica dentro del modelo SWMM.
- Porcentaje del área impermeable tratada (% of impervious Area Treated): Este parámetro especifica la fracción del área permeable que está siendo tratada por las unidades de SUDS.
- Enviar flujo de drenaje a (Send Drain Flow To): Este parámetro determina si el flujo de drenaje recolectado por las unidades de SUDS se dirige a una ubicación específica o si se permite que fluya a través de la salida predeterminada de la subcuenca en el modelo SWMM.

LID Usage Editor

LID Control Name: Pav\_Permeable

Area of Each Unit (sq ft or sq m): 7186

Number of Units: 1

% of Subcatchment Occupied: 16.8

Surface Width per Unit (ft or m): 26.409

% Initially Saturated: 0

% of Impervious Area Treated: 16.78971963

% of Pervious Area Treated: 0

Send Drain Flow To: (Leave blank to use subcatchment outlet)  
N-22

LID Occupies Full Subcatchment

Return all Outflow to Pervious Area

OK Cancel Help

Figura 72. Parámetros utilizados en los LID controls

#### 4.4.2 Parámetros de los SUDS en SWMM

En el caso de los SCALL's, el programa los trata como 'Rain Barrels' (barriles de lluvia). Se propusieron en un total de nueve tipos diferentes de cisternas y tanques de almacenamiento, los cuales se detallan en la tabla 21. Para cada uno de estos tipos, se ingresaba la altura correspondiente.

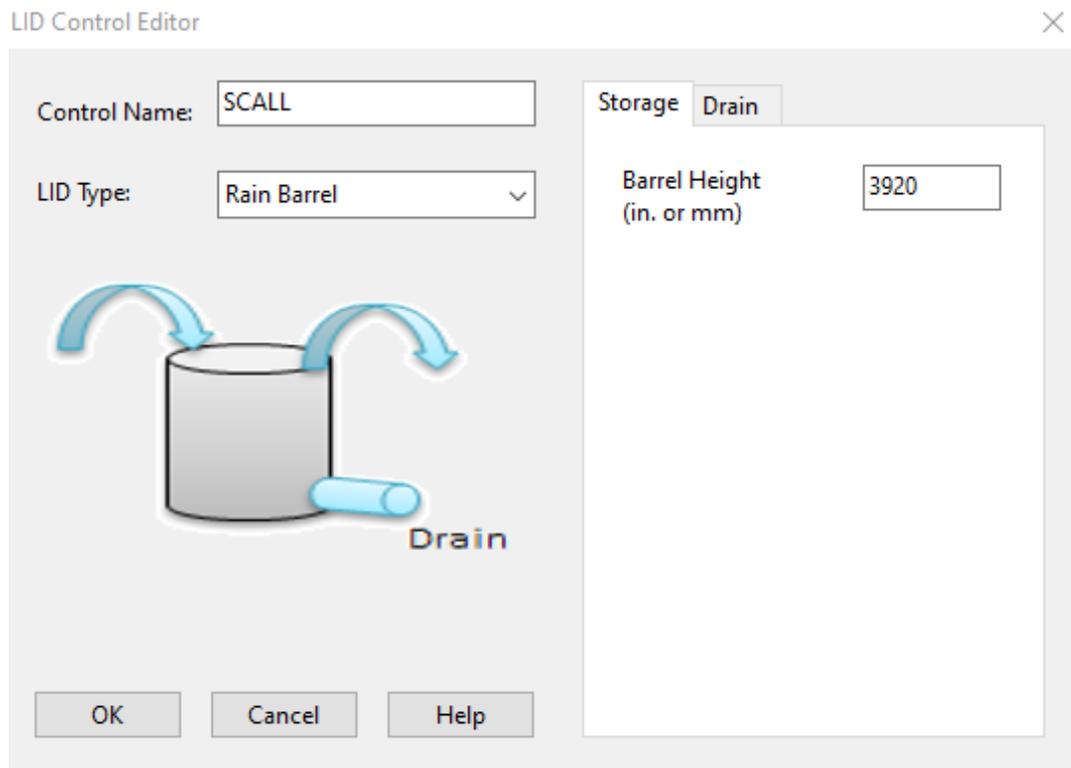


Figura 73. Parámetros utilizados en los SCALLS

En lo que respecta a las cuencas de retención, se tendrá en cuenta las propiedades establecidas en el diseño y el manual de uso de SWMM® (ver Figura 73) según lo establecido por Rossman en 2015.

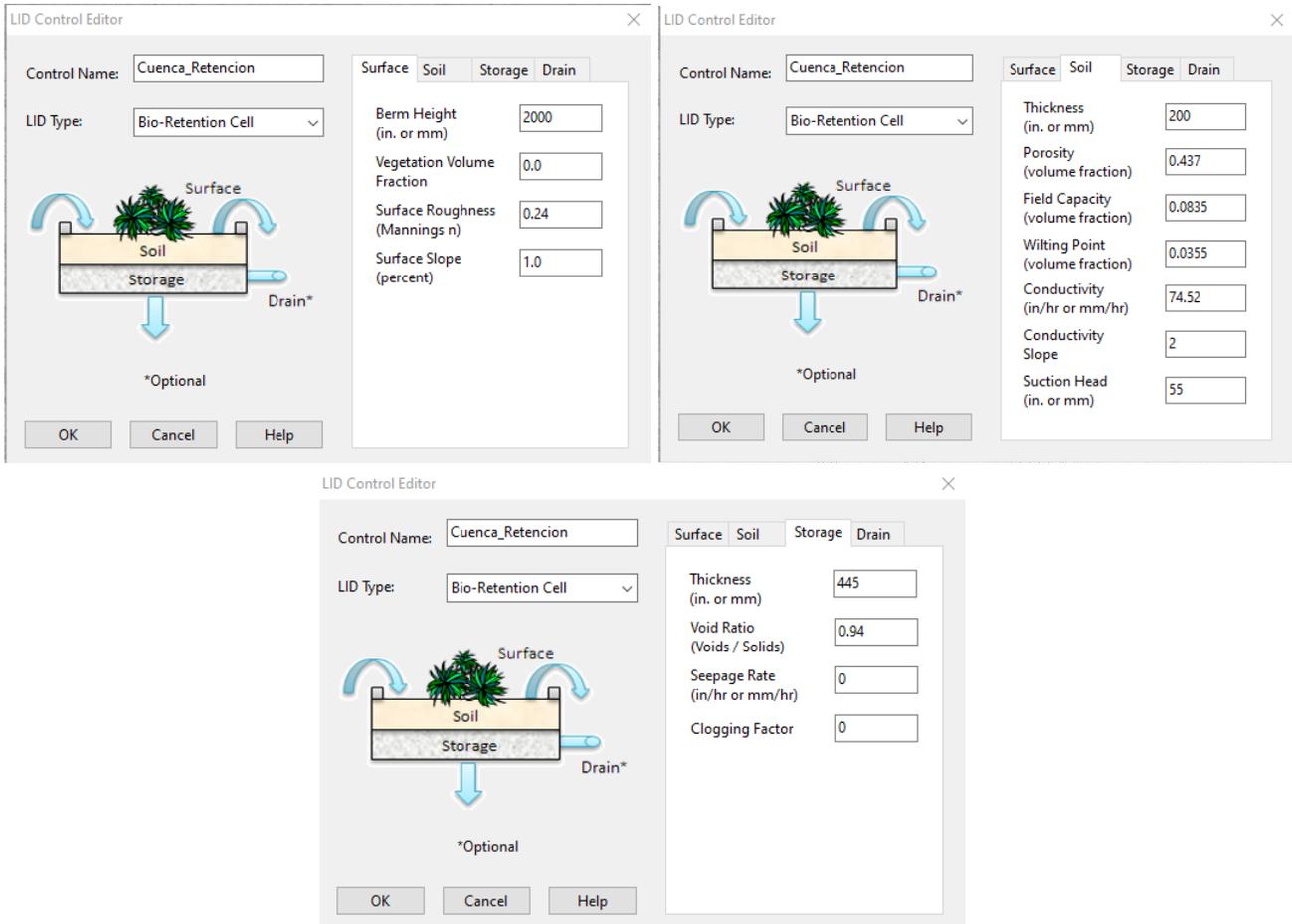


Figura 74. Parámetros utilizados en las cuencas de retención

En los pavimentos permeables, se tendrá en cuenta las propiedades establecidas en el diseño y el manual de uso de SWMM® (ver Figura 74) según lo establecido por Rossman en 2015.

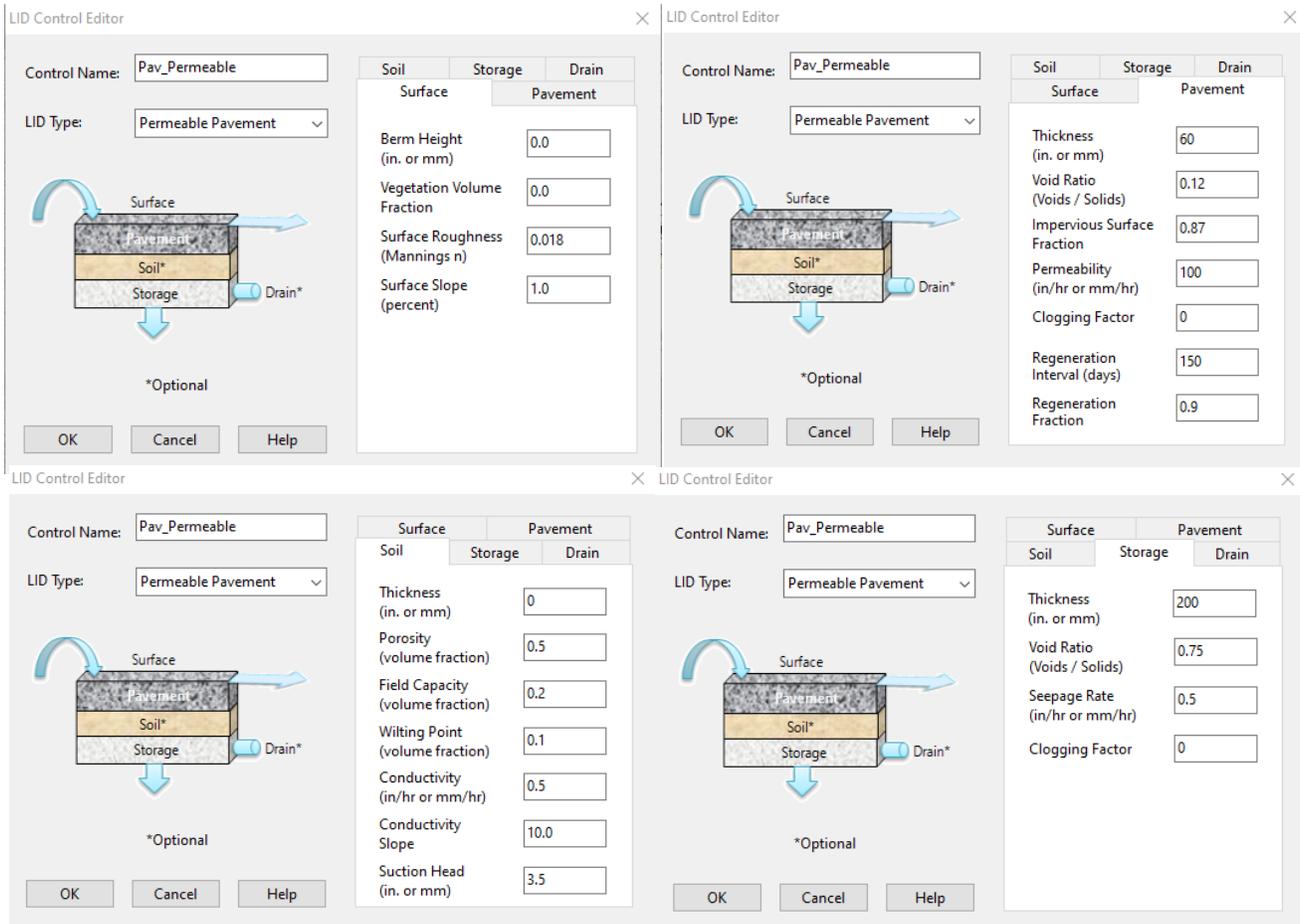


Figura 75. Parámetros utilizados en los pavimentos permeables

#### 4.4.3 Resultados comparando el sistema de drenaje pluvial actual y agregando SUDS en subcuencas y colectores.

La simulación en el programa SWMM se llevó a cabo tras la incorporación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), y se procedió a comparar las tasas de escurrimiento pico tanto en las subcuencas como en los tramos, medidas en litros por segundo.

En el caso de las subcuencas que descargan en la Avenida Promoción, se destacó especialmente la subcuenca 6, donde se observó una reducción significativa en el escurrimiento pico, alcanzando un 82.93%. Esta subcuenca, que tiene un área total de 25,400 m<sup>2</sup>, presenta un SCALL's que abarca 21,348.92 m<sup>2</sup>, lo que equivale al 84.05 % de superficie total.

Asimismo, las subcuencas 5 y 11 exhibieron una reducción del escurrimiento pico superior al 60%. En el caso de la subcuenca 5, el 40.79% de su área total se destina a un SCALL's, un 11.77% se asignó como cuenca de retención y un 8.01 corresponde a pavimento permeable. En la subcuenca 11, el 66.04% del área total se atribuye a un SCALL's.

Las subcuencas 4,13,14,16 y 19 mostraron reducciones de más del 30% en el escurrimiento pico. Destacó particularmente en la subcuenca 4, que cuenta con un SCALL's que ocupa el 24.74% de su área total, mientras que las cuencas de retención abarcan un 6.31% y el pavimento permeable un 5.69% del área total.

En cuanto a las subcuencas 8, 15, 18 y 21, se observó una reducción en el escurrimiento de más del 25% y en las subcuencas 9, 17 y 20 se logró una reducción de más del 10% en el escurrimiento.

En el caso de la subcuenca 10, los escurrimientos pico se mantuvieron sin cambios, dado que no se propuso ningún tipo de SUDS. Esto se debió a que se trata de un terreno actualmente no para ninguna industria ni actividad, y no resulta conveniente proponer un SUDS en un terreno que podría estar comprometido en el futuro.

Tabla 22. Comparación del escurrimiento pico en el drenaje convencional y el drenaje convencional + SUDS en las subcuencas 4 a 21

Subc	Eskurrimiento pico (lps)		% Reducción	% SCALL's	SUDS	
	Drenaje convencional	Drenaje convencional +SUDS			% Cuencas de retención	% Pavimento permeable
4	5571.69	3613.23	35.15	20.74	6.31	5.69
5	2705.91	1064.51	60.65	40.79	11.77	8.01
6	1576.06	268.98	82.93	84.05		
7	8559.65	4964.29	42.01	34.36	3.29	6.43
8	4697.82	3382.06	28.01	1.30		22.39
9	2479.52	2125.15	14.29	1.39		9.76
10	255.44	255.44	0			
11	1625.42	620.96	61.79	66.04		
12	9991.94	7130.58	28.63	29.90		
13	3035.49	2068.29	31.86	17.25	12.96	
14	702.04	490.43	30.14	31.34		
15	1505.63	1081.63	28.16	28.82		
16	2293.49	1486.9	35.17	36.41		
17	928.34	833.84	10.18	10.31		
18	1175.13	881.09	25.02	27.68		
19	1673.58	1106.78	33.87	36.14		
20	1879.84	1584.98	15.69	16.64		
21	1555.75	1152.22	25.94	11.06	10.59	

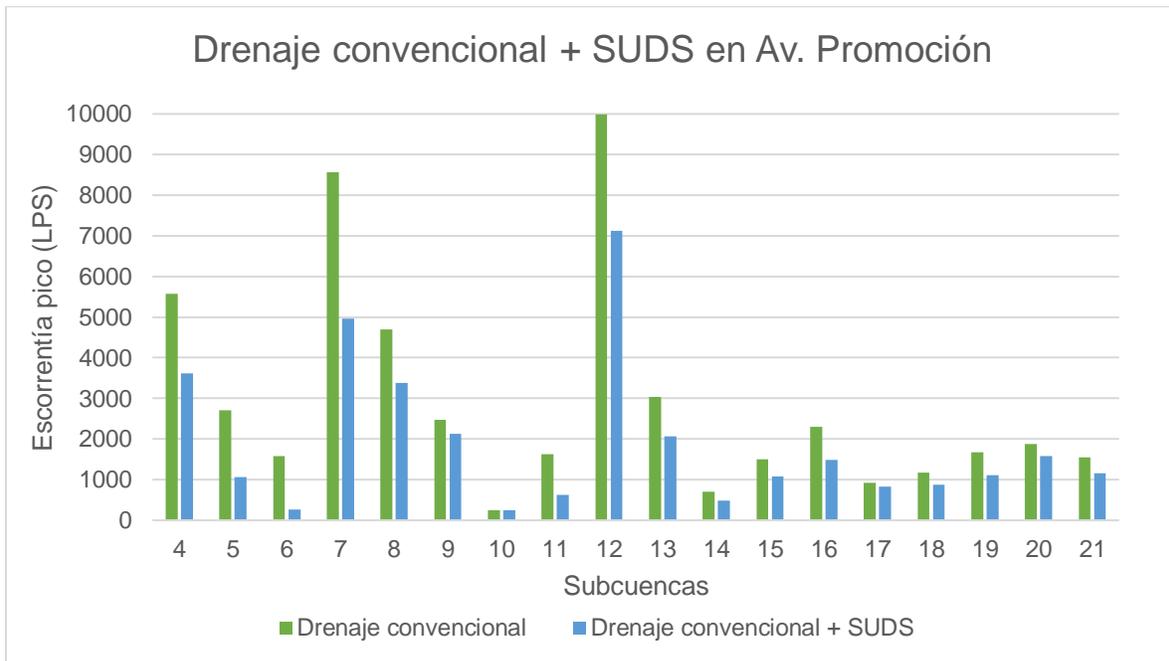


Figura 76. Comparación de la eskorrentía superficial de las subcuencas en la Av. Promoción

Dentro del conjunto de subcuencas que descargan en el Eje 120, un total de 8 subcuencas (1,2,3,22,23,25 y 26). En la tabla 22 se observó una reducción significativa en el escurrimiento pico en la subcuenca 2, alcanzando un promedio del 52.07% es debido a que se propuso un SCALL´s de 27,941.029 m2 del área total de 55,500m2 que representa un 50.34%, también se propuso una cuenca de retención de 1,171 m2 que representa un 2.11% del área total.

Las subcuencas 3 y 26 presentan una reducción en el escurrimiento de más del 49%, en la 3 se propusieron 3 tipos de SUDS: un SCALL´s abarca el 23.06% del área total, el pavimento permeable 16.79% y la cuenca de retención 3.43%. Mientras tanto en la subcuenca 26, se propuso únicamente SCALL´s que representa un 49.28% del área total.

La subcuenca 22 logró una reducción 38.43% en el escurrimiento pico, donde se implementó un sistema de captación de agua de lluvia que abarca un 41.31% del área total.

Sin embargo, en las subcuencas 23, 24 y 25 no hay reducción en el escurrimiento debido a que por las condiciones del terreno de cada una no fue factible la propuesta de un sistema urbano de drenaje sostenible.

Tabla 23. Comparación del escurrimiento pico en el drenaje convencional y el drenaje convencional + SUDS en las subcuencas 1,2,3,22,23,24,25 y 26.

Subc	Eskurrimiento pico (lps)			SUDS		
	Drenaje convencional	Drenaje convencional +SUDS	% Reducción	% SCALL´s	% Cuencas de retención	% Pavimento permeable
1	1596.25	1288.74	19.26	28.40		
2	2547.55	1221.07	52.07	50.34	2.11	
3	1946.65	991.75	49.05	23.06	3.43	16.79
22	3892.38	2396.38	38.43	41.31		
23	802.86	802.86				
24	138.96	138.96				
25	145.26	145.26				
26	869.26	439.41	49.45	49.28		

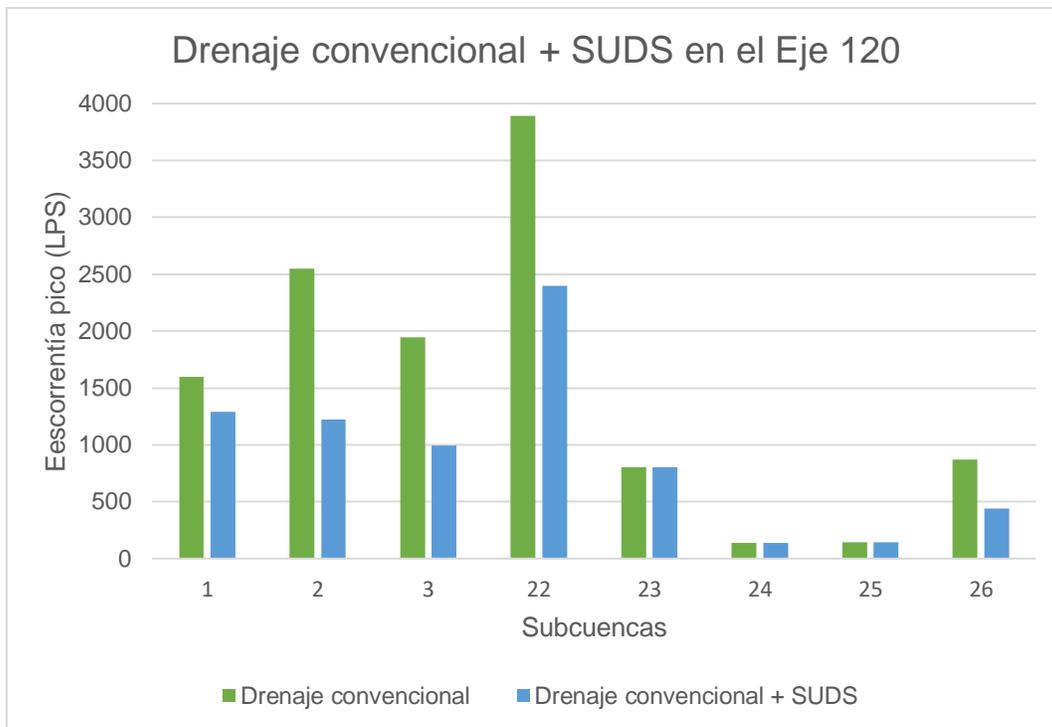


Figura 77. Comparación de la escorrentía superficial de las subcuencas en el Eje 120

Las subcuencas que descargan en el Eje 118 y la Avenida Industrias comprenden el conjunto de subcuencas numeradas de la 27 a 39. Un análisis minucioso de la Tabla 23 revela una reducción en el escurrimiento de más del 74% en dos subcuencas particulares, la 28 y la 32. Ambas subcuencas se beneficiaron de la implementación de SUDS debido a las condiciones actuales de uso de suelo.

En la subcuenca 28, el sistema de captación de agua de lluvia abarca una superficie de 16,856.37 m<sup>2</sup>, lo que representa el 80.27% del área total. En la subcuenca 32, el SUDS ocupa 6,723.10 m<sup>2</sup>, lo que equivale al 73.88% del área total. Estos resultados condujeron a una reducción significativa del escurrimiento pico en ambas subcuencas superando el 74%.

Las subcuencas 29, 35 y 36 marcan una reducción en el escurrimiento pico de más del 62% en todas se propusieron SCALL's, en la subcuenca 29 el SUDS representa el 67.77% que abarca 9,488.36 m<sup>2</sup> del área total de la subcuenca de 14,000m<sup>2</sup> presentando una reducción de escurrimiento del 64.19%, en la subcuenca 35 el

SUDS es de 13,058.809 m<sup>2</sup> que representa el 61.89 del área total de 21,100m<sup>2</sup> y presenta una reducción de escorrentía de 64.19%.

La subcuenca 36 marca una reducción de 67.37% en la que el SUDS abarca un 67.04% del área total. En las subcuencas 30,37 y 38 presentan una reducción de escurrimiento de más del 19% y las 27,33 y 39 menor al 10%.

Tabla 24. Comparación del escurrimiento pico en el drenaje convencional y el drenaje convencional + SUDS en las subcuencas 27 a 39

Subc	Eskurrimiento pico (LPS)			SUDS	
	Drenaje convencional	Drenaje convencional +SUDS	% Reducción	% SCALL's	% Pavimento permeable
27	888.21	803.05	9.58	12.02	
28	1398.87	338.25	75.81	80.27	
29	852.15	305.1	64.19	67.77	
30	405.69	292.17	27.98	28.71	
31	1388.52	679.87	51.03	55.04	
32	697.23	181.23	74.00	73.88	
33	183.32	168.47	8.10	8.97	
34	1051.89	689.65	34.43	36.18	
35	1309.13	495.63	62.14	61.89	
36	422.6	137.84	67.38	67.04	
37	1586.18	1218.48	23.18	7.24	56.28
38	758.18	609.95	19.55	19.12	
39	446.54	432.23	3.20	3.11	

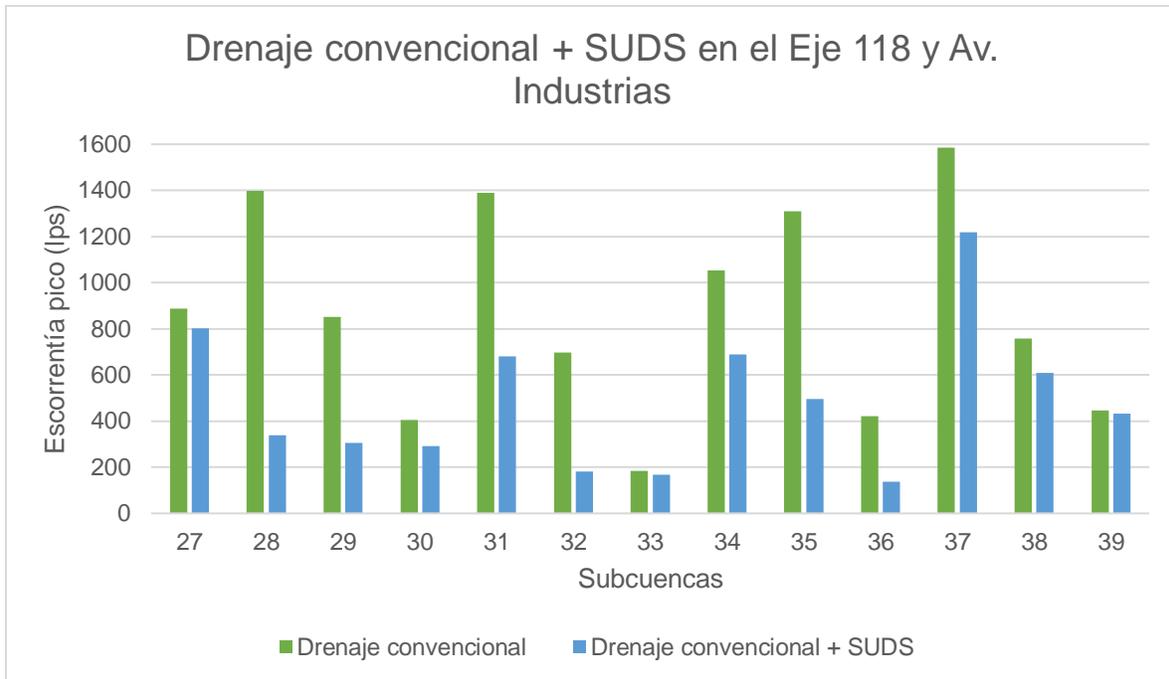


Figura 78. Comparación de la escorrentía superficial de las subcuencas en el Eje 118 y la Av. Industrias

En la Avenida promoción está conformada por las secciones 1,2 y 3. En la sección 1, la reducción de escurrimiento más significativa es la del Tramo 1 (T-1 y T-2) presentando una reducción de flujo del 24% y del 35%

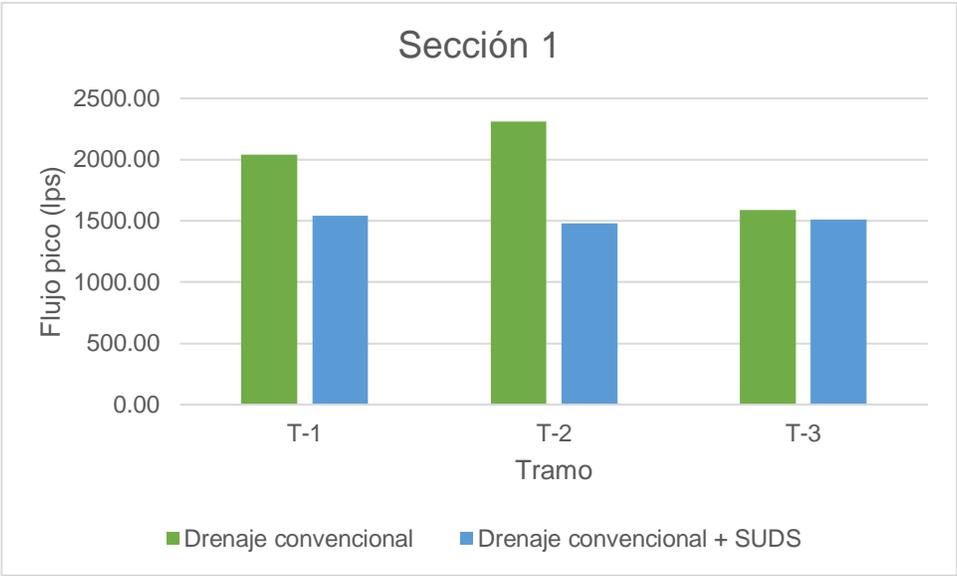


Figura 79. Comparación del flujo en los tramos de la Sección 1

En el caso de la sección 2 que está compuesto por los tramos T-4 a T-7 y T-14 a T-19, de los cuales sólo los tramos 17,18 y 19 presentan una reducción en el flujo de un más del 10% y el T-14 es el tramo que marca una reducción de más del 30%.

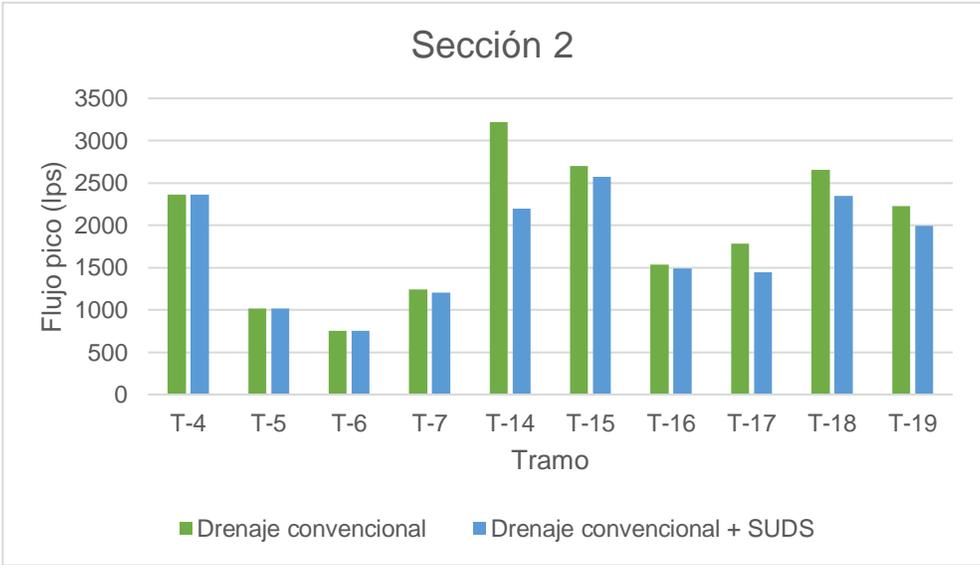


Figura 80. Comparación del flujo en los tramos de la Sección 2

En la sección 3 que tiene los tramos T-8 a T-13, en donde el tramo 9 tuvo una reducción de más del 20% y el tramo 8 que es la que presentó más disminución en escurrimiento de más de un 40%.

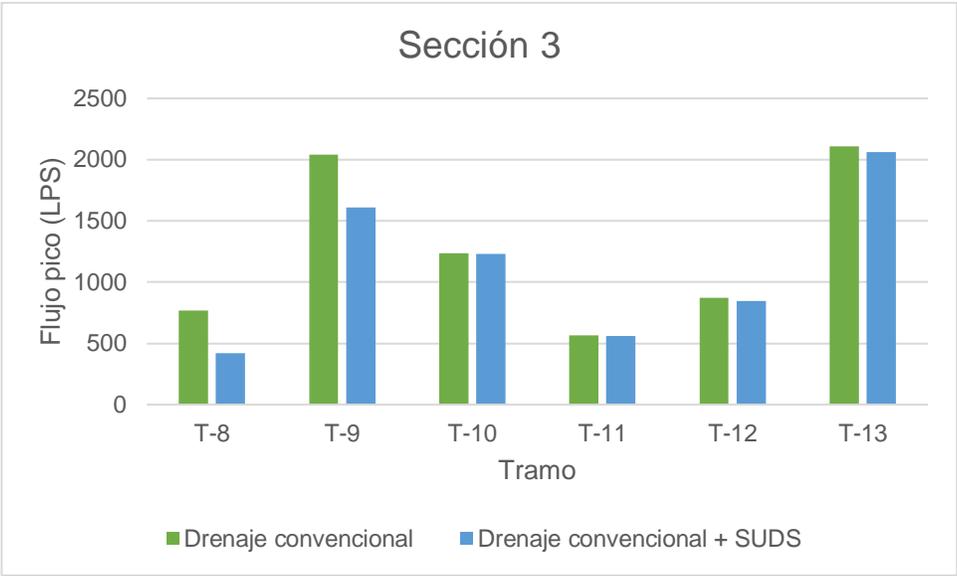


Figura 81. Comparación del flujo en los tramos de la Sección 3

El eje 120 está compuesto por las secciones 4 y 5, la sección 4 es la que presenta una reducción en el flujo notable de 33% en el T-20 y en el T-21 una reducción del 71%.

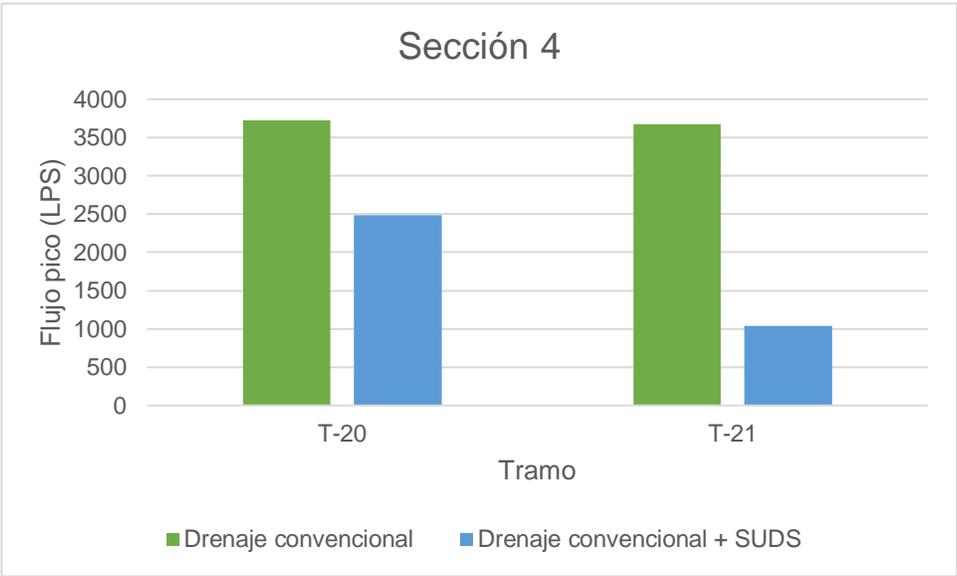


Figura 82. Comparación del flujo en los tramos de la Sección 4

La sección 5 es la más extensa conformada por los tramos T-22 a T-42, el T-25, T-33 y T-35 presenta una reducción en el flujo de más de un 10%, el T-28, T-29, T-30 y T-36 marcan una disminución del flujo de más del 20% y los tramos T-22, T-23 y T-31 de más del 30%.

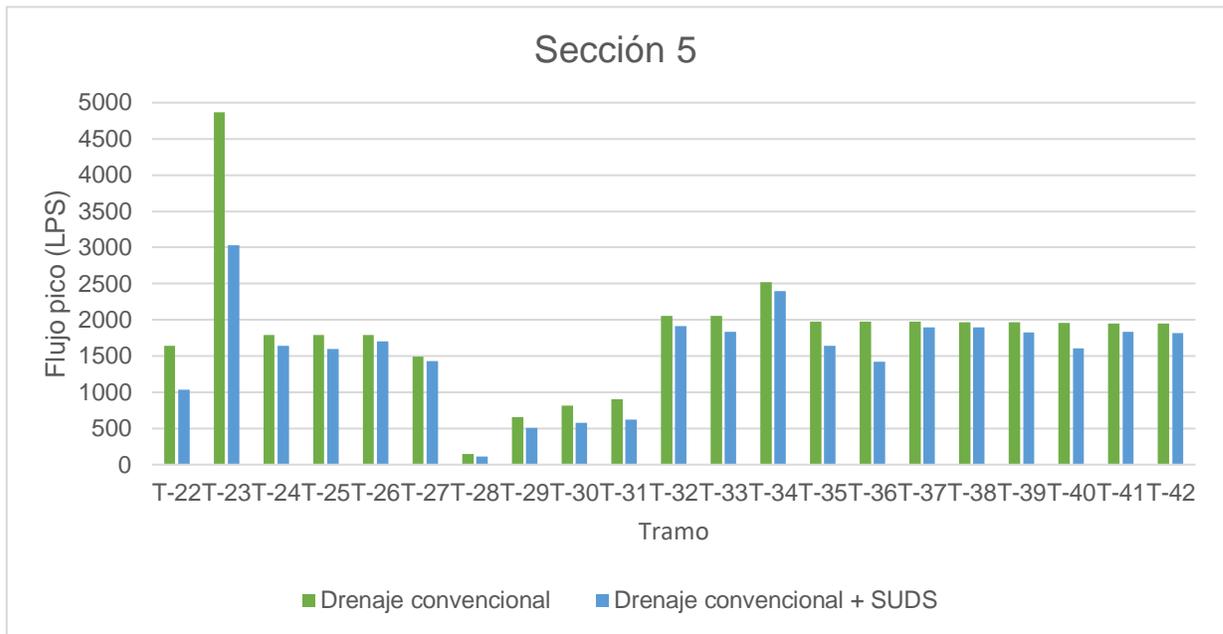


Figura 83. Comparación del flujo en los tramos de la Sección 5

La Av. Industrias la conforman la sección 6 y 7. Con base a los resultados obtenidos en los en el flujo pico agregando los SUDS. En la Sección seis se presenta una reducción de escurrimientos significativa, debido a que marca una disminución de escurrimiento del 43.78% para el tramo 52, el T-51 y T-53 presentan más del 50 % y el tramo T-50 marca una reducción de escurrimiento del 60.76%.

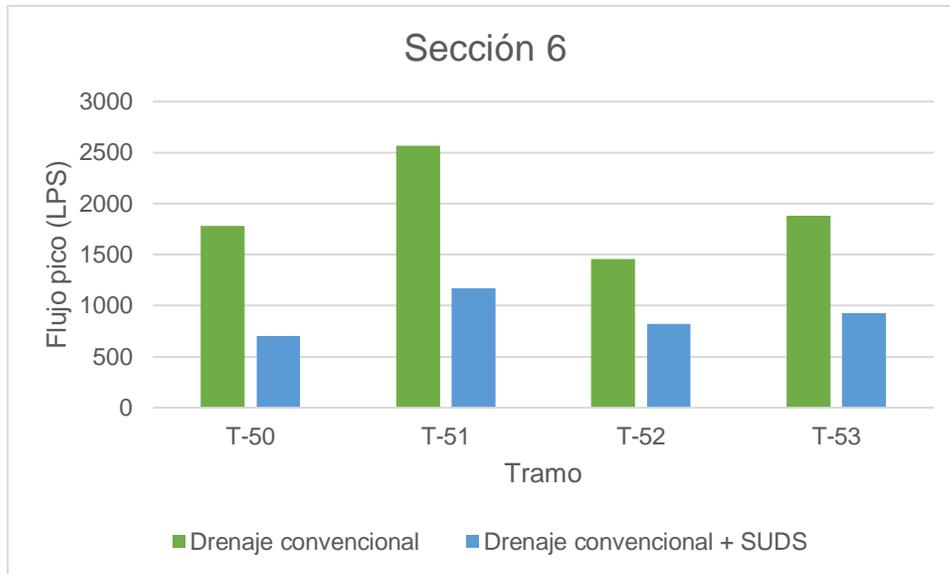


Figura 84. Comparación del flujo en los tramos de la Sección 6

En la sección siete solo se encuentran dos tramos el T-54 y T-55, el T-55 presenta una reducción significativa en el flujo de 47.76%.

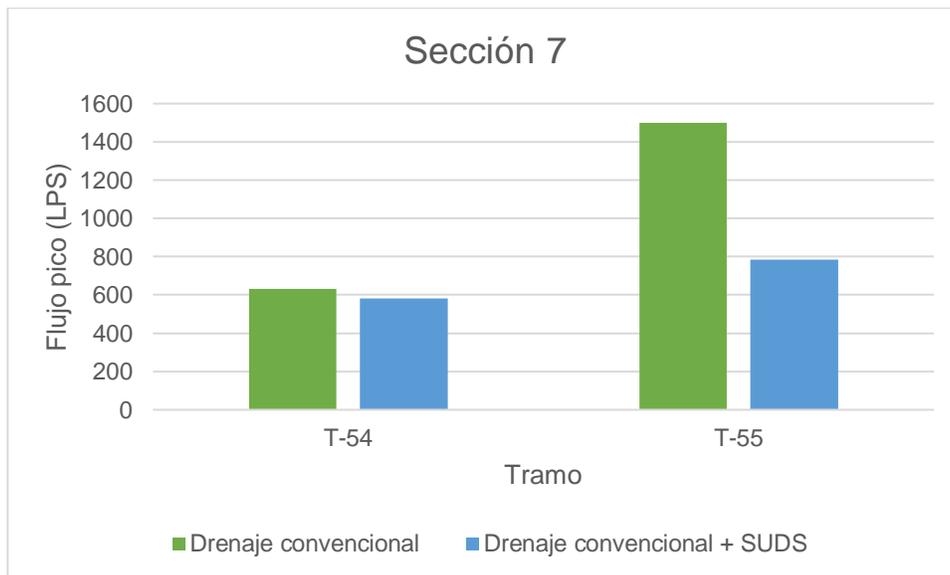


Figura 85. Comparación del flujo en los tramos de la Sección 7

Las reducciones significativas en los flujos que se presentaron en los tramos se deben en su mayoría a los sistemas de captación de agua de lluvia, debido a que los techos en las industrias abarcan en algunos casos más del 50% del tamaño del área de la subcuenca y logra captar la mayor cantidad del agua de las precipitaciones.

En el Eje 118 se encuentra la sección ocho que tiene los tramos T-43 a T-49 y T-56 a T-60. El tramo T-57 presenta una reducción del flujo de más del 10%, la T-48, T-56, T-58 y T-59 es de más del 20%, el T-60 es de más del 30%, los T-45 y T-48 es de más del 40% y las que presentan mayor disminución en el flujo son los T-43 y T-44 con una reducción mayor al 50%.

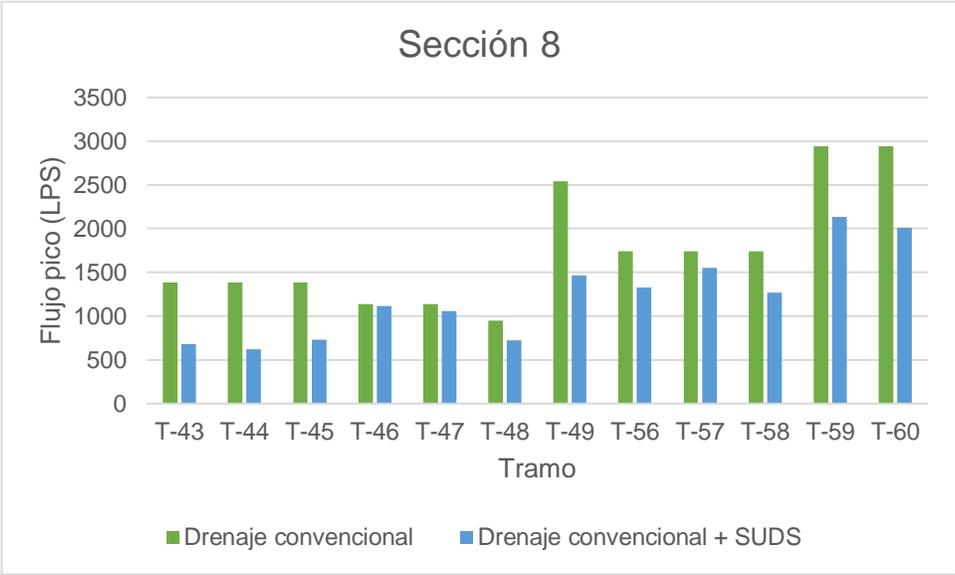


Figura 86. Comparación del flujo en los tramos de la Sección 8

## Desempeño de los SUDS en el programa SWMM

En la tabla 22 se muestra un registro detallado de la efectividad de los SUDS en el programa SWMM.

La tabla 25 presenta una variedad de niveles de efectividad, que abarcan desde un 0% hasta un 100%. Estos valores reflejan el grado de éxito de la mitigación de los impactos del escurrimiento pluvial en el entorno urbano. En el caso de los pavimentos permeables se observa que los pavimentos permeables, si bien son una estrategia prometedora para la gestión del agua pluvial, se muestran un desempeño ligeramente inferior en comparación con otras soluciones propuestas. El porcentaje máximo de efectividad alcanzado por los pavimentos permeables es del 70%.

Las cuencas de retención emergen como uno de los enfoques más efectivos, demostrando una eficacia del 100% en la retención de escurrimientos pluviales. Este resultado destaca la importancia de estas estructuras en la gestión sostenible del agua en entornos urbanos y los SCALL's también exhiben un alto nivel de retención, superando el 90% en la mayoría de los casos. Esto subraya su capacidad para contribuir significativamente a la reducción de escurrimientos en áreas urbanas.

Es impresionante tener en cuenta que, la práctica, suele haber más de una propuesta de SUDS aplicado en las subcuencas. Por lo tanto, los resultados de la tabla reflejan una combinación de diferentes estrategias, lo que proporciona una visión integral del desempeño de los SUDS en el contexto estudiado.

Tabla 25. Desempeño de los SUDS propuestos en la zona industrial

Subc	SUDS	Ingreso (mm)	Pérdidas por EVP	Perdidas por inf.	Flujo superficial (salida)	Drenaje (salida)	Alm. Inicial	Alm. Final	Retención %
Subc-1	SCALL 313	6077.03	0	0	0	0	0	5967.11	98.19
Subc-1	SCALL 65	3553.03	0	0	0	0	0	3488.79	98.19
Subc-2	Cuenca de retención	153.88	0	0	0	0	7.1	157.86	100.00
Subc-2	SCALL 1569	10109.14	0	0	2249.14	0	0	7860	77.75
Subc-3	SCALL 313	9075.1	0	0	1505.1	0	0	7570	83.42
Subc-3	Cuenca de retención	139.87	0	0	0	0	7.1	144.26	100.00

<b>Subc-3</b>	Pavimento Permeable	139.87	0	0.96	42.52	0	0	96.59	69.06
<b>Subc-3</b>	SCALL 65	5207.96	0	0	0	0	0	5092.57	97.78
<b>Subc-4</b>	SCALL 1569	7287.83	0	0	0	0	0	7125.53	97.77
<b>Subc-4</b>	SCALL 65	4988.1	0	0	0	0	0	4877.14	97.78
<b>Subc-4</b>	Cuenca de retención	133.1	0	0	0	0	7.1	137.64	100.00
<b>Subc-4</b>	Pavimento Permeable	133.1	0	0.96	35.53	0	0	96.61	72.58
<b>Subc-4</b>	SCALL 20	1788.23	0	0	0	0	0	1748.71	97.79
<b>Subc-5</b>	Cuenca de retención	136.29	0	0	0	0	7.1	140.9	100.00
<b>Subc-5</b>	Pavimento Permeable	136.29	0	0.96	42.58	0	0	93.02	68.25
<b>Subc-5</b>	SCALL 1569	5128.24	0	0	0	0	0	5027.72	98.04
<b>Subc-6</b>	SCALL 1569	8314.58	0	0	454.58	0	0	7860	94.53
<b>Subc-7</b>	Cuenca de retención	129.15	0	0	0	0	7.1	133.81	100.00
<b>Subc-7</b>	Pavimento Permeable	129.15	0	0.96	33.49	0	0	94.61	73.26
<b>Subc-7</b>	SCALL 1569	5846.67	0	0	0	0	0	5720.8	97.85
<b>Subc-8</b>	SCALL 65	3700.28	0	0	0	0	0	3612.2	97.62
<b>Subc-8</b>	Pavimento Permeable	112.01	0	0.96	16.16	0	0	93.99	83.91
<b>Subc-8</b>	SCALL 10	406.76	0	0	0	0	0	397.56	97.74
<b>Subc-9</b>	Pavimento Permeable	102.79	0	0.96	15.25	0	0	84.93	82.62
<b>Subc-9</b>	SCALL 65	2187.22	0	0	0	0	0	2139.78	97.83
<b>Subc-11</b>	SCALL 1569	6931.83	0	0	0	0	0	6786.5	97.90
<b>Subc-12</b>	SCALL 1569	10382.51	0	0	2522.51	0	0	7860	75.70
<b>Subc-12</b>	SCALL 313	7856.65	0	0	286.65	0	0	7570	96.35
<b>Subc-12</b>	SCALL 35	3894.22	0	0	0	0	0	3804.95	97.71
<b>Subc-13</b>	Cuenca de retención	126.38	0	0	0	0	7.1	131.13	100.00
<b>Subc-13</b>	SCALL 1569	2895.75	0	0	0	0	0	2835.48	97.92
<b>Subc-14</b>	SCALL 65	9614.42	0	0	2024.42	0	0	7590	78.94
<b>Subc-14</b>	SCALL 35	3814.28	0	0	0	0	0	3745.15	98.19
<b>Subc-15</b>	SCALL 313	10940.08	0	0	3370.08	0	0	7570	69.20
<b>Subc-15</b>	SCALL 65	5943.57	0	0	0	0	0	5821.18	97.94
<b>Subc-16</b>	SCALL 1569	6437.98	0	0	0	0	0	6289	97.69
<b>Subc-17</b>	SCALL 313	2426.93	0	0	0	0	0	2382.57	98.17
<b>Subc-18</b>	SCALL 313	7455.58	0	0	0	0	0	7314.46	98.11
<b>Subc-18</b>	SCALL 35	2955.37	0	0	0	0	0	2899.5	98.11
<b>Subc-19</b>	SCALL 1569	2549.16	0	0	0	0	0	2500.66	98.10
<b>Subc-19</b>	SCALL 313	1797.61	0	0	0	0	0	1763.45	98.10

<b>Subc-20</b>	SCALL 1569	1851.2	0	0	0	0	0	1814.76	98.03
<b>Subc-21</b>	SCALL 65	6574.32	0	0	0	0	0	6442.98	98.00
<b>Subc-21</b>	Cuenca de retención	136.08	0	0	0	0	7.1	140.67	100.00
<b>Subc-21</b>	SCALL 10	94.6	0	0	0	0	0	92.93	98.23
<b>Subc-22</b>	SCALL 1569	7609.58	0	0	0	0	0	7391.46	97.13
<b>Subc-26</b>	SCALL 313	11097.9	0	0	3527.9	0	0	7570	68.21
<b>Subc-26</b>	SCALL 25	2902.36	0	0	0	0	0	2847.56	98.11
<b>Subc-27</b>	SCALL 65	4432.66	0	0	0	0	0	4352.43	98.19
<b>Subc-27</b>	SCALL 10	563.46	0	0	0	0	0	553.31	98.20
<b>Subc-28</b>	SCALL 1569	6154.49	0	0	0	0	0	6036.92	98.09
<b>Subc-29</b>	SCALL 313	11123.33	0	0	3553.33	0	0	7570	68.06
<b>Subc-29</b>	SCALL 65	6989.24	0	0	0	0	0	6850.25	98.01
<b>Subc-29</b>	SCALL 30	4043.33	0	0	0	0	0	3963.02	98.01
<b>Subc-30</b>	SCALL 65	7669.15	0	0	79.15	0	0	7513.58	97.97
<b>Subc-31</b>	SCALL 1569	4475.88	0	0	0	0	0	4386.81	98.01
<b>Subc-32</b>	SCALL 313	11463.92	0	0	3893.92	0	0	7570	66.03
<b>Subc-32</b>	SCALL 65	7698.67	0	0	108.67	0	0	7557.49	98.17
<b>Subc-33</b>	SCALL 65	1572	0	0	0	0	0	1544.04	98.22
<b>Subc-34</b>	SCALL 313	6201.78	0	0	0	0	0	6064.48	97.79
<b>Subc-34</b>	SCALL 40	3167.22	0	0	0	0	0	3097.29	97.79
<b>Subc-34</b>	SCALL 10	835.55	0	0	0	0	0	817.39	97.83
<b>Subc-35</b>	SCALL 1569	5202.21	0	0	0	0	0	5097.9	97.99
<b>Subc-36</b>	SCALL 313	5589.16	0	0	0	0	0	5486.07	98.16
<b>Subc-36</b>	SCALL 65	3690.77	0	0	0	0	0	3622.72	98.16
<b>Subc-36</b>	SCALL 10	650.95	0	0	0	0	0	639.02	98.17
<b>Subc-37</b>	Pavimento Permeable	114.7	0	0.96	23.86	0	0	88.54	77.19
<b>Subc-37</b>	SCALL 313	1744.02	0	0	0	0	0	1711.15	98.12
<b>Subc-38</b>	SCALL 313	2885.91	0	0	0	0	0	2831.73	98.12
<b>Subc-38</b>	SCALL 65	1886.15	0	0	0	0	0	1850.78	98.12
<b>Subc-38</b>	SCALL 40	1342.46	0	0	0	0	0	1317.32	98.13
<b>Subc-39</b>	SCALL 65	2243.68	0	0	0	0	0	2190.86	97.65
<b>Subc-39</b>	SCALL 10	345.65	0	0	0	0	0	337.96	97.78

# CAPÍTULO 5. Análisis técnico y económico de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible propuestos.

## 5.1 Estimación de costos de los SUDS

### 5.1.1 Catálogo de conceptos y precios unitarios

Para la elaboración del catálogo de conceptos de este proyecto, se recurrió al uso de la versión de demostración del software Neodata. La elección de esta herramienta se basó en su capacidad de gestionar hasta 50 conceptos, lo que resulta adecuado para el propósito de esta tesis. Además, con el objetivo de enriquecer los catálogos de conceptos requeridos, se incorporaron conceptos ya calculados provenientes de diversas fuentes. Estas fuentes incluyen el ‘Catálogo de Costos Directos de Carreteras 2023’, el ‘Catálogo de Costos Directos de Vivienda 2023’, todos proporcionados por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC). También se utilizaron conceptos del ‘Manual de Proyectos Tipo y Presupuestos de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) y Saneamiento Básico de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en su edición de 2023.

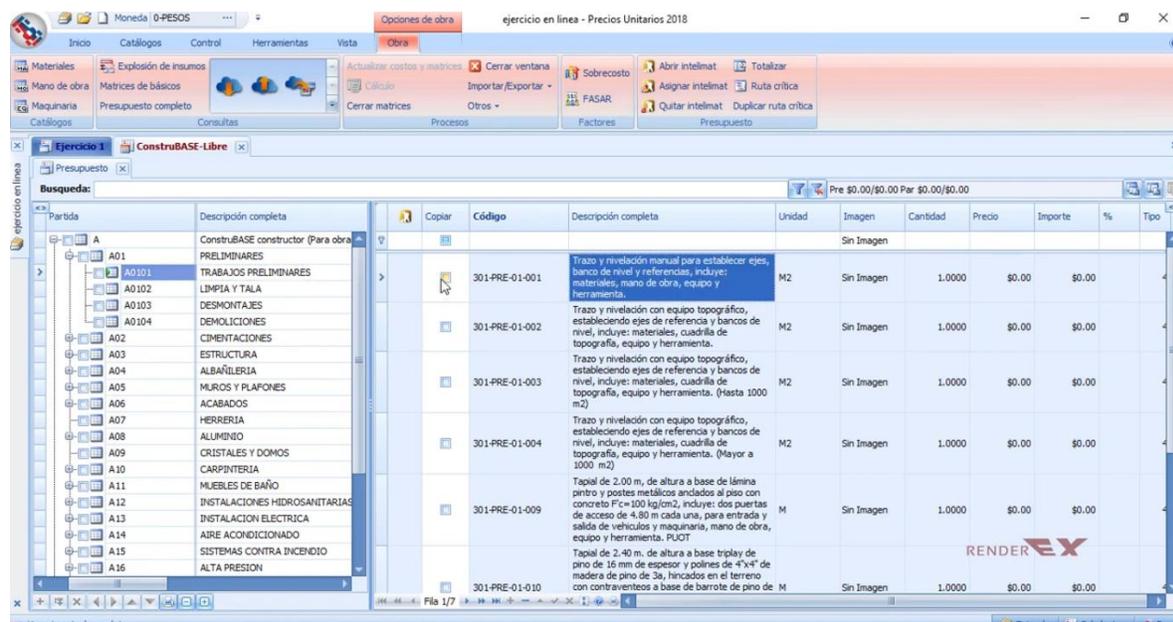


Figura 87. Interfaz de Neodata

Tabla 26. Presupuesto para los SCALL's

<b>Sistemas de captación de agua de lluvia</b>					
<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo directo</b>	<b>Importe</b>
	Sistema de almacenamiento				
<b>001</b>	Suministro, colocación y acomodo de grava con T.M.A. ¾" como preparación para recibir base de concreto del tanque de almacenamiento; incluye: herramienta, mano de obra y acarreo máximos de 10m.	m <sup>3</sup>	52.70	\$13.25	\$698.28
<b>002</b>	Construcción de base de concreto, resistencia F'c=200Kg/Cm <sup>2</sup> , reforzado con malla electrosoldada 6x6- 8/8 F'Y=5000 Kg/cm <sup>2</sup> ; tamaño máximo agregado 20mm (¾"), Incluye: materiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para su correcta ejecución.	m <sup>3</sup>	105.40	\$568.10	\$59,877.74
<b>003</b>	Suministro, e instalación del tanque o cisterna de almacenamiento, prefabricada con capacidad nominal de 10,000 lts, con certificación de cumplimiento de grado alimenticio conforme a la norma FDA, con protección UV y que cumpla con la NMX-C-374-ONNCCE-CNCP-2012, con preparación de fábrica o hechas en obra, para tubería de ingreso, toma de agua, salida de excedencias y desagüe de fondo, Incluye: Suministro de piezas especiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	pieza	6.00	\$34,675.16	\$208,050.96
<b>004</b>	Suministro, e instalación del tanque o cisterna de almacenamiento, prefabricada con capacidad nominal de 20,000 lts, con certificación de cumplimiento de grado alimenticio conforme a la norma FDA, con protección UV y que cumpla con la NMX-C-374-ONNCCE-CNCP-2012, con preparación de fábrica o hechas en obra, para tubería de ingreso, toma de agua, salida de excedencias y desagüe de fondo, Incluye: Suministro de piezas especiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	pieza	1.00	\$98,664.47	\$98,664.47
<b>005</b>	Suministro, e instalación del tanque o cisterna de almacenamiento, prefabricada con capacidad nominal de 25,000 lts, con certificación de cumplimiento de grado alimenticio conforme a la norma FDA, con protección UV y que cumpla con la NMX-C-374-ONNCCE-CNCP-2012, con preparación de fábrica o hechas en obra, para tubería de ingreso, toma de agua,	pieza	1.00	\$112,712.71	\$112,712.71

	salida de excedencias y desagüe de fondo, Incluye: Suministro de piezas especiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.				
<b>006</b>	Suministro, e instalación del tanque o cisterna de almacenamiento, prefabricada con capacidad nominal de 30,000 lts, con certificación de cumplimiento de grado alimenticio conforme a la norma FDA, con protección UV y que cumpla con la NMX-C-374-ONNCCE-CNCP-2012, con preparación de fábrica o hechas en obra, para tubería de ingreso, toma de agua, salida de excedencias y desagüe de fondo, Incluye: Suministro de piezas especiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	pieza	1.00	\$136,665.57	\$136,665.57
<b>007</b>	Suministro, e instalación del tanque o cisterna de almacenamiento, prefabricada con capacidad nominal de 35,000 lts, con certificación de cumplimiento de grado alimenticio conforme a la norma FDA, con protección UV y que cumpla con la NMX-C-374-ONNCCE-CNCP-2012, con preparación de fábrica o hechas en obra, para tubería de ingreso, toma de agua, salida de excedencias y desagüe de fondo, Incluye: Suministro de piezas especiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	pieza	3.00	\$194,051.00	\$582,153.00
<b>008</b>	Suministro, e instalación del tanque o cisterna de almacenamiento, prefabricada con capacidad nominal de 40,000 lts, con certificación de cumplimiento de grado alimenticio conforme a la norma FDA, con protección UV y que cumpla con la NMX-C-374-ONNCCE-CNCP-2012, con preparación de fábrica o hechas en obra, para tubería de ingreso, toma de agua, salida de excedencias y desagüe de fondo, Incluye: Suministro de piezas especiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	pieza	2.00	\$221,344.00	\$442,688.00
<b>009</b>	Suministro, e instalación del tanque o cisterna de almacenamiento, prefabricada con capacidad nominal de 65,000 lts, con certificación de cumplimiento de grado alimenticio conforme a la norma FDA, con protección UV y que cumpla con la NMX-C-374-ONNCCE-CNCP-2012, con preparación de fábrica o hechas en obra, para tubería de ingreso, toma de agua,	pieza	32.00	\$330,071.00	\$10,562,272.00

	salida de excedencias y desagüe de fondo, Incluye: Suministro de piezas especiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.				
<b>010</b>	Tanque metálico de 313m <sup>3</sup> marca Tank Connection	pieza	16.00	\$2,701,677.80	\$43,226,844.80
<b>011</b>	Tanque metálico de 1569m <sup>3</sup> marca Tank Connection	pieza	19.00	\$5,823,241.35	\$110,641,585.65
<b>012</b>	Suministro y colocación de entrada al tanque con reductor de turbulencia con tubería de 4" (100mm) de diámetro. Incluye: 2.5M de tubería de PVC, 3 codos 4" X90, TEE 4"X4", mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	juego	35.00	\$656.05	\$22,961.75
<b>013</b>	Suministro y colocación de válvula de desagüe de 1 ½" multiconector, incluye conexión de salida y multiconector con válvula de esfera, mano de obra; equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	pieza	35.00	\$226.96	\$7,943.60
<b>014</b>	Sistema de captación distribución Suministro y colocación de tubo PVC sanitario de 100mm de diámetro, incluye: materiales, acarreo, cortes, desperdicios, mano de obra, pruebas de equipo y herramienta.	m	157.50	\$139.43	\$21,960.23
<b>015</b>	Suministro y colocación de codo de PVC sanitario para cementar de 90°X102mm, Incluye: Materiales, acarreo, cortes, desperdicios, instalación, mano de obra, pruebas, equipo y herramienta.	pieza	140.00	\$74.91	\$10,487.40
<b>016</b>	Suministro y colocación de TEE de PVC sanitario cementar de 100mm. Incluye: Materiales, acarreo, instalación, mano de obra, pruebas, equipo y herramienta.	pieza	70.00	\$106.00	\$7,420.00
<b>017</b>	Suministro, instalación y adecuación de canaletas pluviales prefabricadas de lámina galvanizada con ancho de canal de mínimo 10cm. Incluye: Canaleta; 2 tapas de extremo, uniones; 2 conectores de bajada; soportes y fijación con separación máxima de 1.50m, materiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	m	27968.11	\$352.61	\$9,861,835.27
<b>018</b>	Suministro e instalación de sistema de separación de primeras aguas de lluvias con filtro separador de hojas, que evite el ingreso de agentes contaminantes al tanque de almacenamiento, elaborado con polipropileno, polietileno u otro	pieza	35.00	\$1209.69	\$42,339.15

	material que garantice que no se afectarán las condiciones organolépticas del agua captada. Incluye materiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.				
<b>019</b>	Depósito para primeras aguas de lluvias en tinaco bicapa de 450 lts de capacidad. Incluye materiales, mano de obra, equipo, herramienta, acarreo totales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.	pieza	35.00	\$2463.59	\$86,225.65
				<b>Total</b>	<b>\$176,133,386.22</b>

Tabla 27. Presupuesto para las cuencas de retención

<b>Cuencas de Retención</b>					
<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo directo</b>	<b>Importe</b>
<b>001</b>	Excavación a mano para desplante de estructura en cualquier material común excepto roca; seco hasta 1.00m de profundidad. Incluye: Herramienta, mano de obra y todo lo necesario para su correcta ejecución	m <sup>3</sup>	36,904.00	\$105.94	\$3,909,609.76
<b>002</b>	Acarreo 1er kilómetro de material de producto de excavación (Excepto roca) en camión de volteo, descarga a volteo en camino plano brecha, lomerío suave terracerías, lomerío pronunciado revestido, montañoso o pavimentado.	m <sup>3</sup>	36,904.00	\$317.52	\$11,717,758.08
<b>003</b>	Acarreo para Km subsecuentes de material producto de excavación (Excepto roca) en camión de volteo, en camino plano brecha, lomerío suave terracerías, lomerío pronunciado revestido, montañoso o pavimentado	m <sup>3</sup>	36,904.00	\$15.62	\$576,440.48
<b>004</b>	Concreto f'c=150 kg/cm <sup>2</sup> tamaño máximo del agregado de 38 mm hecho en obra para cimentaciones y obras de urbanización incluye: materiales, desperdicio, acarreo, vaciado, vibrado, artesa y curado de agua.	m <sup>3</sup>	3690.4	\$2,953.29	\$10,898,821.42
<b>005</b>	Concreto hecho en obra f'c=150 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	681.194	\$2070.84	\$1,410,643.783
<b>006</b>	Suministro, colocación y acomodo de grava con T.M.A. ¾"	m <sup>3</sup>	7380.80	\$568.10	\$4,193,032.48
<b>007</b>	Cama de arena para apoyo de tuberías, incluye: materiales, mano de obra, herramienta, acarreo y desperdicios medido compacto.	m <sup>3</sup>	1804.70	\$553.51	\$998,919.497
<b>008</b>	Suministro y plantado de árbol casuarinas de 30cm de alto, incluye: Excavación, vara de apoyo para soportar la lluvia y el viento y todo lo necesario para su correcta terminación.	pieza	52	\$297.10	\$15,444
<b>009</b>	Suministro y colocación de árboles ficus de 10cm de diámetro máximo de tronco y altura de 0 a 1.20m. Incluye: Excavación con herramienta manual de 0.40m de diámetro X 40m. de profundidad, relleno con tierra lama y acarreo a una 1ª. Estación a 20m de distancia horizontal.	pieza	67	\$108.92	\$7,297.64
				<b>Total</b>	<b>\$29,818,357.38</b>

Tabla 28. Presupuesto para los pavimentos permeables

<b>Pavimento Permeable</b>					
<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo directo</b>	<b>Importe</b>
<b>001</b>	Limpia y desyerbe del terreno realizado a mano, incluye acarreo libre dentro del sitio de los trabajos a pie de camión, limpieza, la herramienta y el equipo necesario	m <sup>2</sup>	104,503	\$13.25	\$1,384,664.75
<b>002</b>	Excavación a mano para desplante de estructura en cualquier material común excepto roca; seco hasta 1.00m de profundidad. Incluye: Herramienta, mano de obra y todo lo necesario para su correcta ejecución	m <sup>3</sup>	52,251.5	\$105.94	\$5,535,523.91
<b>003</b>	Acarreo 1er kilómetro de material de producto de excavación (Excepto roca) en camión de volteo, descarga a volteo en camino plano brecha, lomerío suave terracerías, lomerío pronunciado revestido, montañoso o pavimentado.	m <sup>3</sup> /Km	52,251.5	\$317.52	\$16,590,896.28
<b>004</b>	Acarreo para km subsecuentes de material producto de excavación (Excepto roca) en camión de volteo, en camino plano brecha, lomerío suave terracerías, lomerío pronunciado revestido, montañoso o pavimentado	m <sup>3</sup> -Km	52,251.5	\$15.62	\$816,168.43
<b>005</b>	Compactador de impacto, bailarina, marca Bosh, modelo 18-942, con motor de 4.2 H-P. para mezcla de aceite gasolina 1:25, sin Carter	hr	497.63	\$283.60	\$141,127.87
<b>006</b>	Concreto hidráulico f'c=150 kg/cm <sup>2</sup> resistencia normal, tamaño máximo de agregado de hasta 38mm incluye: materiales, acarreos, vaciado a bote, curado con agua, artesa y desperdicios.	m <sup>3</sup>	2,090.06	\$2,953.29	\$6,172,553.30
<b>007</b>	Suministro, colocación y acomodo de grava con T.M.A. ¾"	m <sup>3</sup>	10,450	\$568.10	\$5,936,815.43
<b>008</b>	Piso de adoquín de concreto en color de 30X30X6 cm asentado sobre cama de grava.	m <sup>2</sup>	104,503	\$462.5	\$48,332,637.5
				<b>Total</b>	<b>\$84,910,387.47</b>

## 5.2 Presupuesto final de obra

Con base en la información previamente mencionada, se ha calculado el costo total del proyecto, tal como lo detalla en la Tabla 29. En esta tabla, se observa que el elemento de mayor impacto en términos de costo es el SCALL, con un presupuesto de \$176,133,386.22. A pesar de su elevado costo, este sistema destaca por su eficiencia de retención del agua pluvial, superando el 90% de retención, lo que convierte en una inversión significativa. Este aumento en costos se debe en gran parte al precio de los sistemas de almacenamiento propuestos como tanques y cisternas.

Por otro lado, los pavimentos permeables, a pesar de su eficacia en la reducción de escurrimientos, con un máximo del 70%, también conllevan un costo significativo asociado a la excavación, acarreo y tipo de adoquín propuesto. En contraste, las cuencas de retención presentan un costo más económico, aunque esto se debe, en parte, a la extensión en metros cuadrados en comparación con otros sistemas. No obstante, es fundamental resaltar que las cuencas de retención logran retener el 100% del agua.

Tabla 29. Presupuesto final del proyecto

Tipo	m <sup>2</sup>	Presupuesto
<b>SCALL</b>	474,154.05	\$176,133,386.22
<b>Pavimentos Permeables</b>	104,503.00	\$84,910,387.47
<b>Cuencas de Retención</b>	36,904.00	\$29,818,357.38
<b>Total</b>	615,561.05	\$290,862,131.07

A partir de este análisis presupuestario, se han calculado los costos por metro cuadrado de los SUDS. Es interesante observar que los pavimentos permeables presentan el mayor costo por m<sup>2</sup>, con \$812.52, a pesar de su impacto en la reducción de escorrentía. Por otro lado, las cuencas de retención, a pesar de cumplir con el 100% de retención, presentan un costo más elevado debido a la menor cantidad de metros cuadrados propuestos.

Sorprendentemente, se destaca que el costo por metro cuadrado del SCALL es el más bajo con tan solo \$371.47, a pesar de su presupuesto total elevado. Esto se debe a que la cantidad de metros cuadrados propuestos compensa de manera

efectiva el costo global. Esto demuestra que el SCALL's es el SUDS más eficiente en cuanto a costo y reducción de escorrentía, lo que conviene en una opción atractiva en el marco de este proyecto.

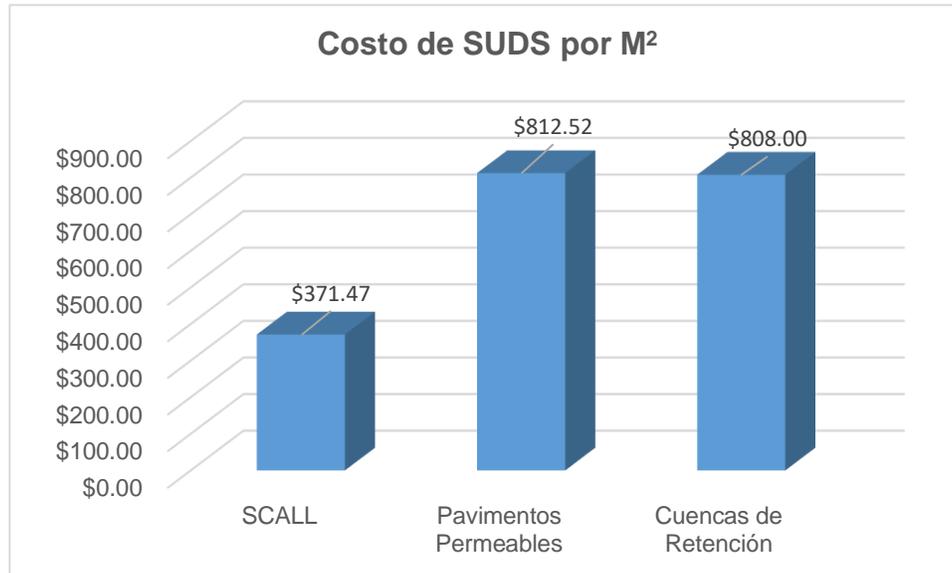


Figura 88. Costo de los SUDS por m²

## 5.3 Impacto económico del uso del agua captada

### 5.3.1 Costo de mantenimiento

Con base a los conceptos detallada en cada SUDS, se procedió a realizar una cotización que engloba todos los aspectos del proyecto. El resultado de este análisis arroja un costo total del proyecto de \$290,862,131.07. Este monto comprende los recursos necesarios para la implementación de pavimentos permeables, SCALL´s, así como las cuencas de retención, como se detalla en las tablas 26, 27, 28 y 29 del presente trabajo.

La mano de obra requerida para ejecución del proyecto se encuentra incluida en los diversos conceptos de cada uno de los SUDS. Esto garantiza que la implementación del proyecto se lleve a cabo de manera eficiente y de acuerdo a los estándares establecidos.

En cuanto al costo de mantenimiento, siguiendo la metodología propuesta por Bonem en 2018, se estima que se oscilará entre el 4% y el 6% del costo de inversión total inicial del proyecto, con la excepción del costo asociado a las cisternas de almacenamiento de los SCALL´s. En este contexto el costo de mantenimiento se estima en \$399,405.0644. Este monto permitirá la adecuada operación y conservación de los SUDS a lo largo del tiempo, contribuyendo a la sostenibilidad y eficacia del proyecto en su conjunto.

### 5.3.2 Proyección del costo de agua ahorrada por la implementación de los SUDS

Dado que las empresas pueden variar en sus costos de agua dependiendo de su ubicación y tipo de actividad, hemos optado por utilizar un costo promedio de \$80.00 por metro cúbico de agua.

Considerando los cálculos realizados para los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) implementados en este proyecto, se obtienen los siguientes resultados:

- Para los SCALL's, se proyecta una retención de agua de lluvia de 38,341.35 m<sup>3</sup>, conforme a las especificaciones detalladas en el apartado 4.3.3 y la figura 68.
- Las cuencas de retención de agua de lluvia, diseñadas siguiendo las especificaciones presentadas en el apartado 4.3.2 y la figura 67, permiten la retención de 7,380.80 m<sup>3</sup>.
- Respecto a los pavimentos permeables, se estima una retención del escurrimiento de 20,900 m<sup>3</sup> de agua de lluvia, de acuerdo a las especificaciones del apartado 4.3.1 y la figura 66.

En consecuencia, se prevé un ahorro anual de 66,622.15 m<sup>3</sup> de agua de lluvia gracias a la implementación de los SUDS en el proyecto.

Considerando la tarifa de agua vigente en 2023 de \$80.00 por m<sup>3</sup>, el ahorro anual en costos de agua se estima en \$5,329,772.00, lo que equivale a \$444,147.66 mensuales. Cabe destacar que esta proyección se basa en los costos de agua del año 2023. No obstante, se reconoce que los costos del agua podrán experimentar incrementos en los años próximos. Por lo tanto, se deberá ajustar esta sección del proyecto a los costos vigentes en cada año.

## 5.4 Viabilidad económica

### 5.4.1 Valor Actual Neto (VAN)

El VAN es la diferencia entre el valor presente de los flujos de efectivo entrantes y salientes de un proyecto de inversión. Se calcula restando la inversión inicial del valor presente de los flujos de efectivo futuros. Un VAN positivo indica que el proyecto podría ser rentable (Coss,1995).

$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r)^n}$$

$I_0$ =Inversión inicial

$C_n$ = Flujo de caja o beneficios generados por la inversión en cada periodo.

$N$ = Número total de periodos

$n$ = Año en el que se van obteniendo los beneficios de cada periodo.

$r$ = TIR

### 5.4.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, hemos calculado la Tasa Interna de retorno (TIR), que es un indicador clave de la rentabilidad de proyectos o inversiones. Como menciona Altuve (2004), la TIR es un factor determinante: a mayor TIR, mayor rentabilidad.

La TIR se define como la tasa de descuento que se hace que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero, es decir, la tasa que equilibra la suma del valor presente en los gastos con la suma del valor presente de los ingresos proyectados.

$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$

$I_0$ =Inversión inicial

$C_n$ = Flujo de caja o beneficios generados por la inversión en cada periodo.

$N$ = Número total de periodos

$n$ = Año en el que se van obteniendo los beneficios de cada periodo.

$r$ = TIR

## Interpretación del resultado de la TIR

TIR>0. El proyecto es aceptable, ya que su rentabilidad es mayor que la rentabilidad mínima requerida o coste de oportunidad.

TIR<0. El proyecto se rechaza. La razón es que el proyecto da una rentabilidad menor que la rentabilidad mínima requerida.

TIR=0. En este caso sería indiferente realizar el proyecto, ya que ni se gana ni se pierde.

### 5.4.3 Valor residual (VR)

El valor residual se refiere al valor estimado de un activo al final de su vida útil. Cuando se realiza un análisis de inversión para evaluar la rentabilidad de un proyecto, se proyectan los flujos de efectivo futuros que generará ese proyecto. Estos flujos de efectivo pueden provenir de ingresos, costos operativos, inversiones adicionales, etc. (Coss, 1995).

El VR entra en juego al final de la vida útil proyectada del activo. Después de considerar todos los flujos de efectivo previstos durante el periodo de análisis, se puede agregar un valor estimado para el activo al final de ese periodo. Este valor residual representa la posible cantidad de dinero que se podría vender o disponer del activo al final de su vida útil (Coss, 1995).

En la fórmula del VAN, el valor residual se descuenta al valor presente utilizando la tasa de descuento utilizada para los flujos de efectivo proyectados. La fórmula del VAN con valor residual es (Coss, 1995):

$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} + \frac{VR}{(1+r)^n}$$

$I_0$ =Inversión inicial

$C_n$ = Flujo de caja o beneficios generados por la inversión en cada periodo.

$N$ = Número total de periodos

$n$ = Año en el que se van obteniendo los beneficios de cada periodo.

$r$ = TIR

$VR$ = Valor residual al final al final del periodo de análisis

#### 5.4.4 Cálculo del VAN y TIR del proyecto

Para el cálculo de la TIR, se empleó el presupuesto previamente calculado en el apartado 5.2.1, del cual asciende a \$290,862,131.10. Además, se consideró un ahorro anual estimado de \$5,329,772.00, junto con un costo de mantenimiento de \$399,405.064.

Utilizando la herramienta de Microsoft Excel, se procedió al cálculo de la TIR. El resultado de este cálculo se presenta en la tabla 26.

Tabla 30. Cálculo de la tasa interna de retorno

Año	Monto ahorrado	Gastos	Valor neto (I-G)
0	0	290862131.1	-290862131.1
1	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
2	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
3	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
4	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
5	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
6	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
7	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
8	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
9	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
10	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
11	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
12	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
13	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
14	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$5,596,588.44
15	\$5,995,993.50	\$399,405.06	\$296,458,719.54
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)			<b>1.92%</b>

Debido a que la TIR es mayor a 0, se considera que el proyecto en función de los periodos analizados es factible o redituable.

Para determinar el VAN se utilizó la ecuación de la sección 5.4.1 y con ayuda del software Excel y con base a la tabla 30 fijando una tasa de interés anual del 8%, la cual recomendada por la FAO (2005).

Tabla 31. Cálculo del valor actual neto

Año	Valor neto (I-G)	VAN
0	-290862131.1	0
1	\$3,288,131.13	-\$287,817,565.24
2	\$3,288,131.13	-\$284,998,522.77
3	\$3,288,131.13	-\$282,388,298.27
4	\$3,288,131.13	-\$279,971,423.73
5	\$3,288,131.13	-\$277,733,576.93
6	\$3,288,131.13	-\$275,661,496.56
7	\$3,288,131.13	-\$273,742,903.63
8	\$3,288,131.13	-\$271,966,428.69
9	\$3,288,131.13	-\$270,321,544.48
10	\$3,288,131.13	-\$268,798,503.56
11	\$3,288,131.13	-\$267,388,280.47
12	\$3,288,131.13	-\$266,082,518.36
13	\$3,288,131.13	-\$264,873,479.37
14	\$3,288,131.13	-\$263,753,998.82
15	\$3,288,131.13	\$28,144,688.34

De acuerdo al resultado de \$ 28,144,688.34 a una tasa de interés del 8%, se considera que la inversión será aceptable contemplando el valor residual del proyecto.

## 5.5 Análisis de factibilidad técnica del proyecto

El diseño expuesto de SUDS se demuestra técnica y visiblemente viable, dado que no afecta el casco urbano como se ilustra en la Figura 81.

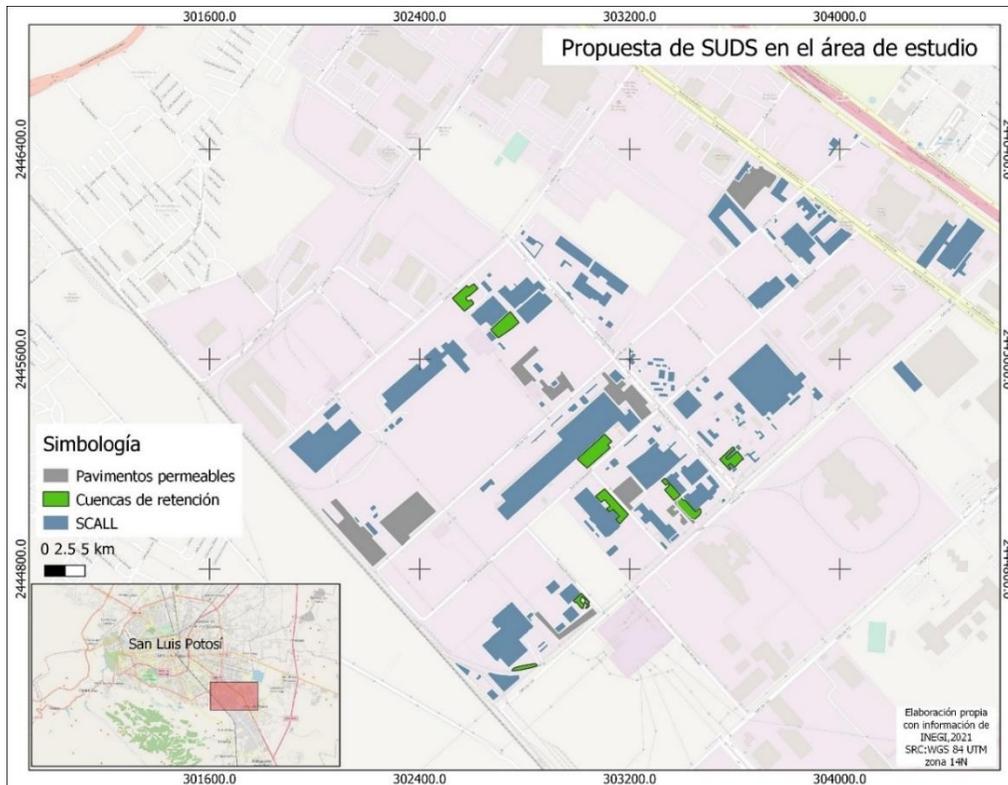


Figura 89. Propuesta de SUDS en la zona de estudio

En la extensa área de estudio, de las 39 subcuencas trazadas, se ha propuesto la implementación de SUDS en 34 de ellas. La subcuenca 10 no cuenta con propuestas específicas, debido a su condición de terreno baldío y la incertidumbre respecto al uso futuro. Además, las subcuencas 23,24,25 y 28 no han sido contempladas para SUDS, ya que abarcan parte de la infraestructura vial de la zona propuesta.

La implementación de SUDS propuesta conlleva una mejora significativa en el aprovechamiento del agua captada en los SCALL's, a través de tanques de almacenamiento estratégicamente ubicados dentro de las instalaciones industriales.

La factibilidad técnica del diseño se sustenta, ya que la tecnología existente de los SUDS se puede ejecutar, asegurando que la implementación no solo puede realizarse, sino que también genere un impacto positivo en las industrias. Esta

iniciativa representa una solución radical a la problemática de las inundaciones, abordando de manera efectiva los desafíos presentes en la zona de estudio.

Sub	SCALL's	Pavimentos permeables	Cuencas retención
1	X		
2	X		X
3	X	X	X
4	X	X	X
5	X	X	X
6	X		
7	X	X	X
8	X	X	
9	X	X	
10			
11	X		
12	X		
13	X		X
14	X		
15	X		
16	X		
17	X		
18	X		
19	X		
20	X		
21	X		X
22	X		
23			
24			
25			
26	X		
27	X		
28			
29	X		
30	X		
31	X		
32	X		
33	X		
34	X		
35	X		
36	X		
37	X	X	

38	X		
39	X		

### Capacidad de las tuberías

En el análisis del alcantarillado pluvial de la zona de estudio, se considera el parámetro crítico de la capacidad de las tuberías. Se han identificado y seleccionado los tramos críticos del sistema, caracterizados por cambios hidráulicos significativos a lo largo de su longitud. Estos tramos se ubican estratégicamente en la Av. Promoción, el Eje 120 y la Av. Industrias. Cada simulación hidráulica tiene una duración de 2 horas, presentando la capacidad de las tuberías en intervalos de 1 minuto.

En el tramo de Av. Promoción, es específicamente en el segmento T-8 a T-13, comprendido entre nodos N9 a N15, se observa un marcado pico en el intervalo de tiempo de 01:06:00. La capacidad del tramo sin implementación de SUDS es de 0.96, mientras que con la inclusión de SUDS, esta capacidad se reduce a 0.72, lo que representa una disminución del 25%. En el tramo T-9, se identifican picos menos prominentes, pero igualmente significativos a lo largo de la duración de la precipitación.

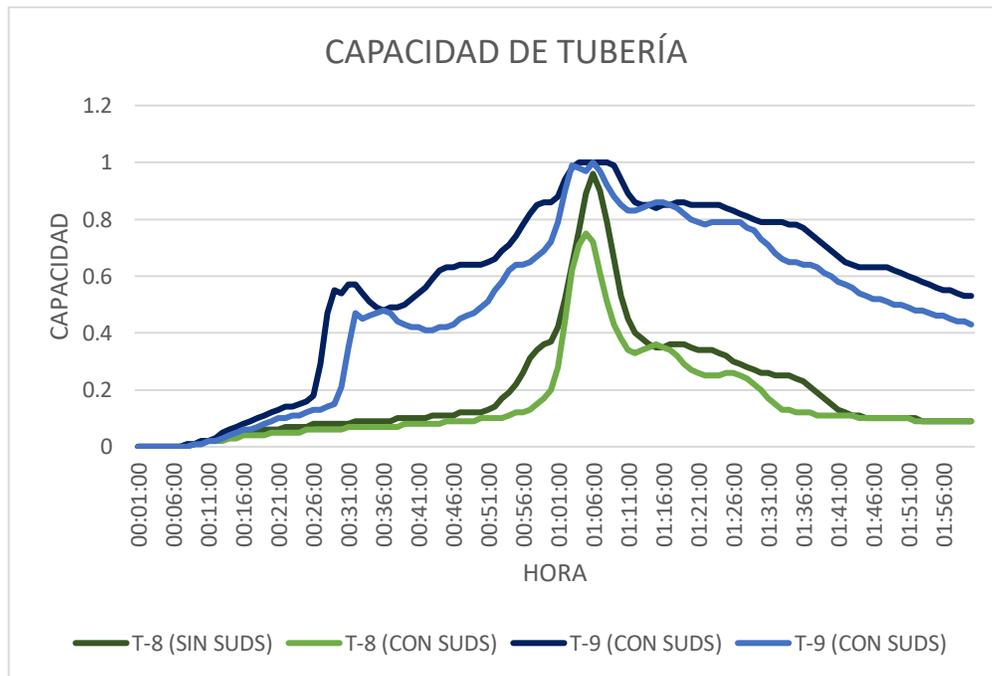


Figura 90. Comparación de la capacidad en los tramos T-8 y T-9 en la Av. Promoción

En el segmento T-10 a T-13, se evidencian cambios notables hasta el intervalo de tiempo de 00:30:00; sin embargo, después de este periodo, la capacidad de los conductos permanece constante. Esto se atribuye al tamaño reducido de los SUDS propuestos en esas subcuencas, los cuales no logran impactar de manera significativa en la capacidad de escorrentía.

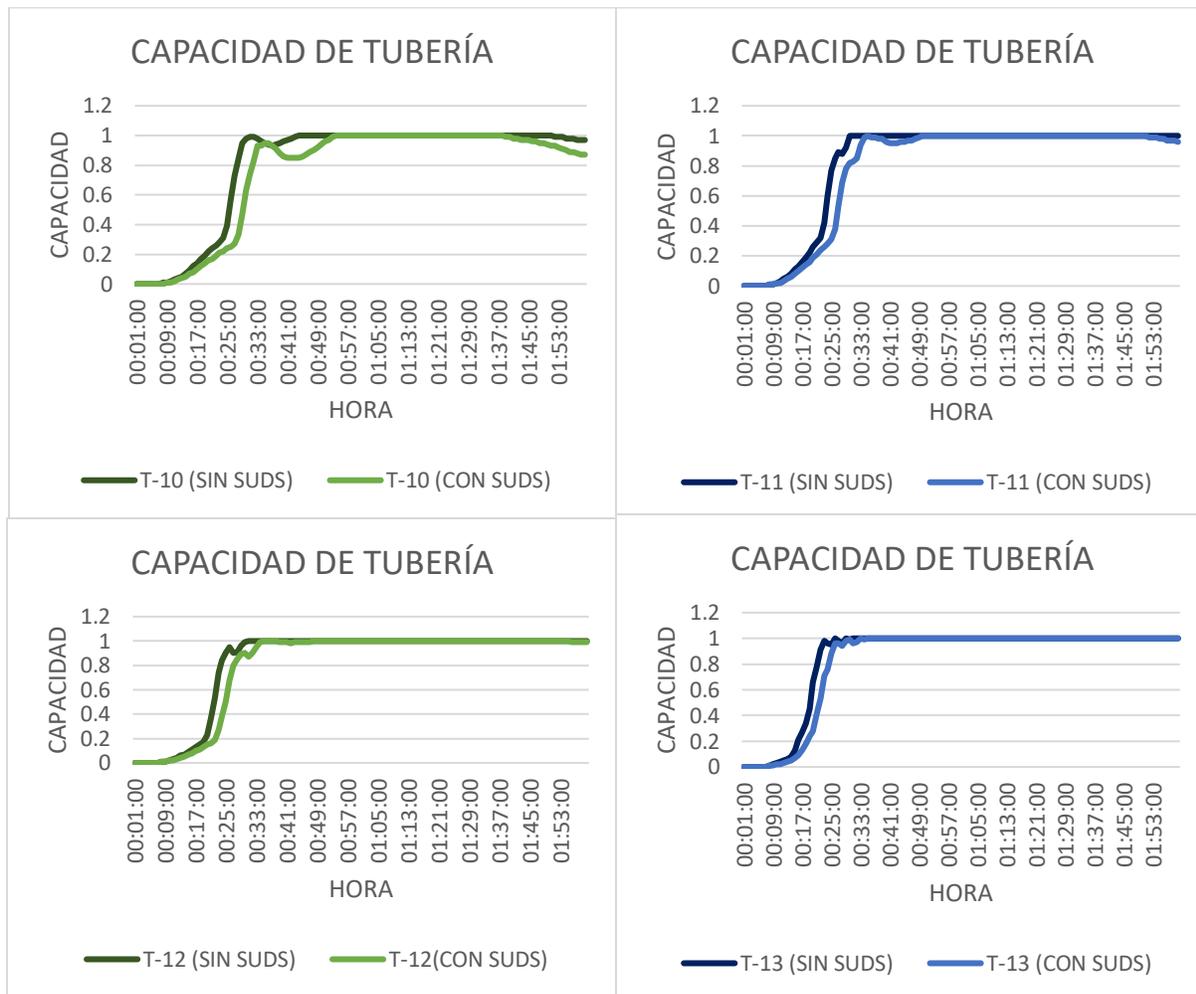


Figura 91. Comparación de la capacidad en los tramos T-10 a T-13 en la Av. Promoción

En el Eje 120, se han incluido los tramos T-20 y T-21, donde se destaca el pico importante en la tubería T-20 disminuye en el intervalo de tiempo 01:06:00, pasando de 1 sin SUDS a 0.5 con SUDS, reflejando una reducción del 50% en la capacidad. En el T-21, durante el intervalo de tiempo de 01:05:00, se observa una disminución del escurrimiento del 16%, y a lo largo del trayecto, se presentan reducciones similares en la capacidad. Esto se debe a la implementación de SCALL's en dicho tramo, abarcando un porcentaje sustancial del área de las subcuencas propuestas.

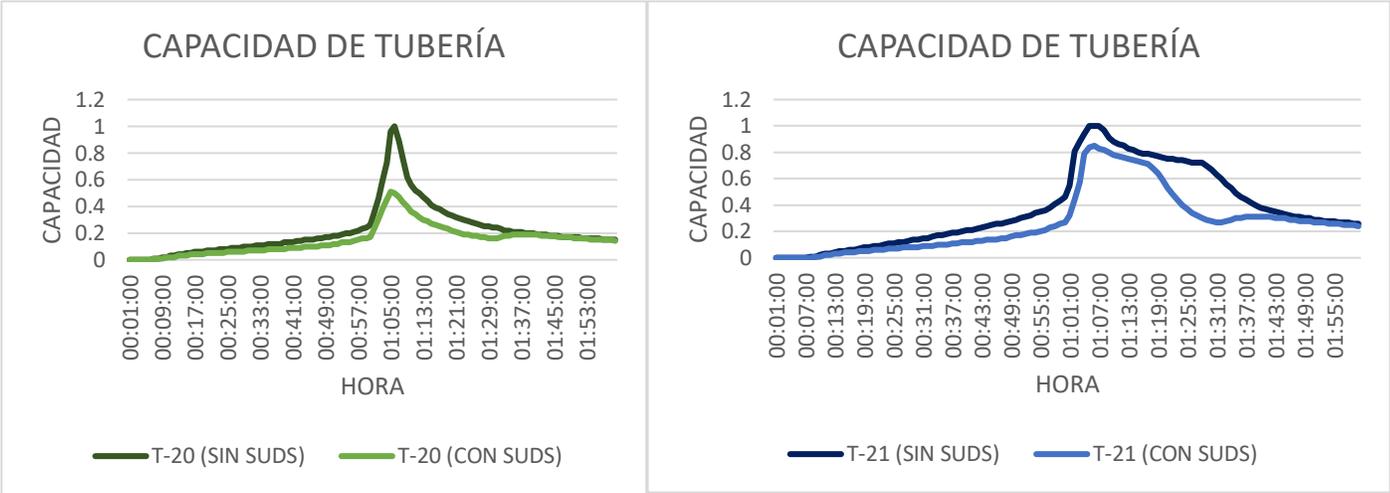


Figura 92. Comparación de la capacidad en los tramos T-20 y T-21 en el Eje 120

En la Av. Industrias, el patrón de escurrimiento es similar al Eje 120, y la incorporación de SUDS abarca un porcentaje aún mayor del área total, contribuyendo así la gestión sostenible del agua de la zona de estudio

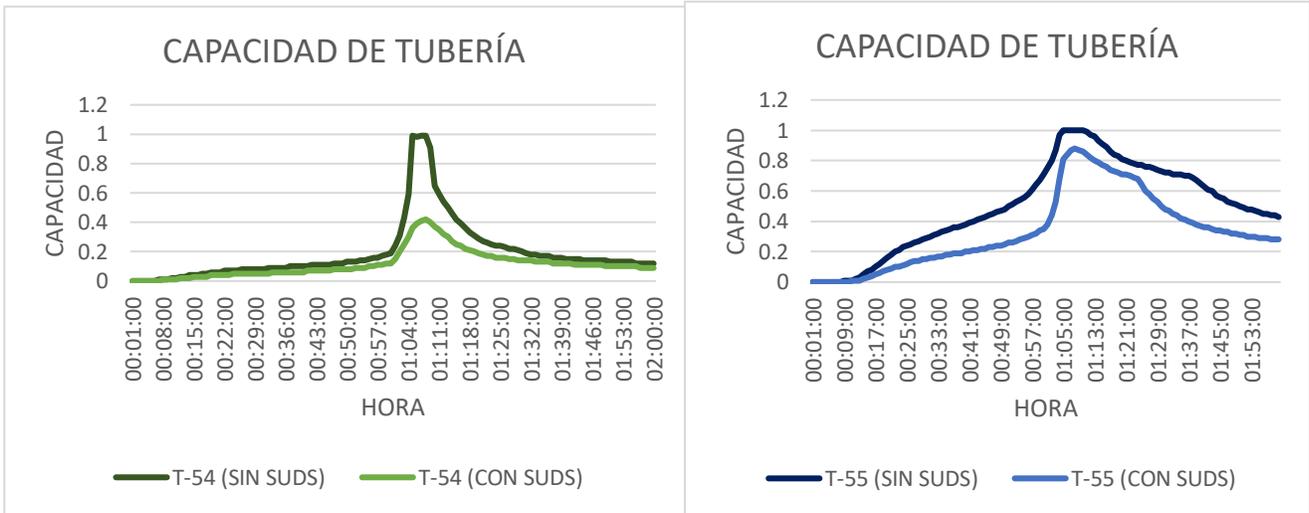


Figura 93. Comparación de la capacidad en los tramos T-54 y T-55 en la Av. Industrias

## Factor de inundación

En este proyecto se llevó a cabo un análisis detallado del factor de inundación en el programa SWMM. Este parámetro, conocido como “flooding”, que simula el desplazamiento del agua en sistemas de alcantarillado pluvial. Este factor hace referencia a la capacidad de un sistema para gestionar y mitigar inundaciones durante eventos de lluvia intensa.

La simulación en el programa SWMM se aplicó tanto al sistema de alcantarillado pluvial existente como a una versión mejorada con la incorporación de SUDS. La evaluación se centró en el tiempo pico de la precipitación, establecido en 1 hora y dos minutos. En el caso del sistema sin SUDS, se identificaron nodos N-1 a N-13 y N-15 a N-18, N-44 a N-52 (16 en total), el nivel de inundación es máximo. En los nodos N-19, N-46 Y N-56 tienen un nivel de inundación muy alto, en los nodos N-48 y N-49 que representan un nivel de inundación medio y los nodos N-8, N-9, N-10, N-14, N-20 a N-43, N-45, N-47, N-50, N-51, N-53, N-54, N-55, N-57, N-58, N-59, N-60 (39 en total) marcaban un nivel bajo de inundación.

Con la incorporación de los SUDS en el programa SWMM, se evidenciaron cambios significativos. Los nodos N-1 a N-6, N-12, N-13, N-15 a N-18 (11 en total) el nivel de inundación es máximo, el nodo N-11 el nivel de inundación es medio y en los nodos N-2, N-7 a N-10, N-14 y N-19 a N-60 (48 en total) se registró un nivel bajo de inundación.

Tabla 32. Nivel de inundación en los nodos trazados en el programa SWMM

	SIN SUDS	CON SUDS
<b>INUNDACIÓN</b>	<b>NODOS</b>	
<b>BAJO</b>	39	48
<b>MEDIO</b>	2	1
<b>ALTO</b>	0	0
<b>MUY ALTO</b>	3	0
<b>MAXIMO</b>	16	11
<b>TOTAL</b>	<b>60</b>	<b>60</b>

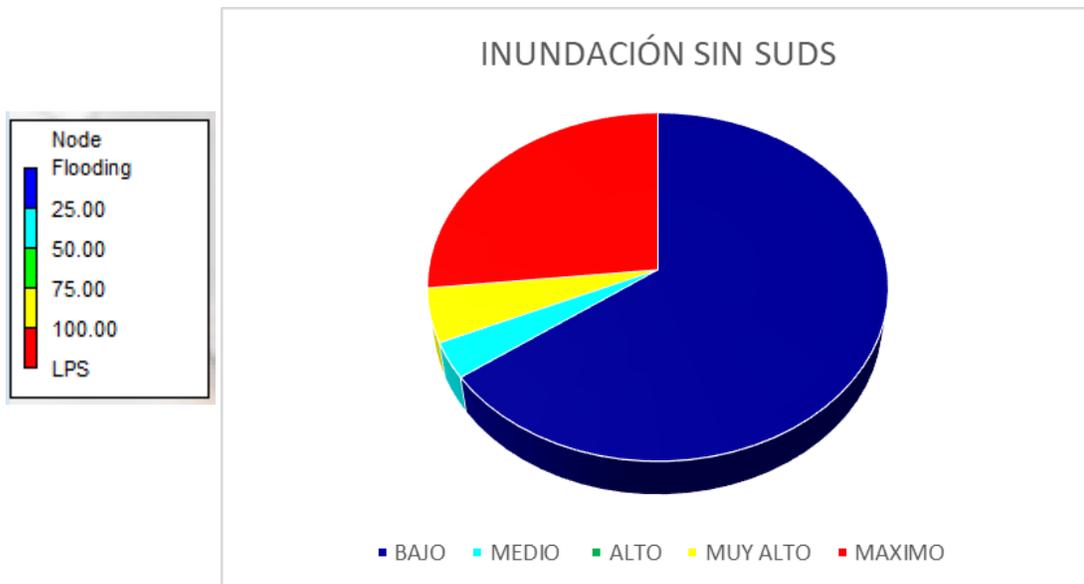


Figura 94. Inundación en los nodos sin incorporar SUDS



Figura 95. Inundación en los nodos incorporando SUDS

Al comparar los resultados en la Tabla 28 y las Figuras 86 y 87, se destaca una diferencia de ocho nodos, los cuales experimentaron un cambio en el porcentaje de inundación. Se pasó de 41 nodos con niveles bajos sin SUDS a 49 nodos con la incorporación de SUDS representando una reducción del 16.33% en la inundación de los 60 nodos evaluados.

## Conclusiones

Se ha determinado que, en los últimos años, se ha producido un cambio significativo en el uso de suelo en la zona industrial. En comparación con el año 1990, cuando el 98.87% del área industrial estaba destinado a la agricultura sin presencia de asentamientos humanos, para el año 2018, este paisaje experimentó una drástica transformación alcanzando un 90.23% de la totalidad del área industrial.

El análisis reveló la presencia de grandes caudales de escurrimiento, llegando hasta 9000 litros por segundo en las subcuencas propuestas. Esta observación sugiere que la gestión actual del agua pluvial resulta insuficiente, lo cual se traduce en un funcionamiento al límite (100%) de la capacidad de los colectores, generando inundaciones recurrentes en la zona.

La utilización del programa SWMM permitió evaluar los porcentajes de reducción de escurrimientos en las subcuencas consideradas. De las 39 subcuencas analizadas, se destaca una subcuenca con una notable reducción del 80%, seguida de dos subcuencas con el 70%. Además, se identificaron cinco subcuencas con una reducción del 60%, dos con el 50%, y otras siete mostraron un 20% de disminución en el escurrimiento. Cinco subcuencas revelaron un 10% de reducción, y únicamente tres subcuencas evidenciaron una disminución menor al 10%.

Estos resultados destacan la eficacia variable de las propuestas implementadas, subrayando la necesidad de estrategias de gestión del agua más sofisticadas y adaptativas en la zona industrial para abordar los retos derivados de los cambios de uso de suelo y los altos niveles de escurrimientos pluviales.

Entre los SUDS propuestos, se destaca la efectividad total del 100% en las cuencas de retención, ya que logran retener la totalidad de la precipitación recibida. En segundo lugar, los SCALL's exhiben una efectividad del 90%, seguidos por los pavimentos permeables con un 70% de efectividad.

Al analizar el presupuesto total destinado a la implementación de los SUDS, se observa que la mayor inversión, representando el 59.05, se destina a los SCALL's. Le sigue en porcentaje el gasto de pavimentos permeables, alcanzando un 30.33%

del presupuesto final y el tercer lugar, las subcuencas de retención que absorben el 10.65% restante.

Los resultados obtenidos que sugieren que, desde una perspectiva de costo-beneficio, los SCALL's presentan una ventaja significativa. A pesar de representar la menor inversión por metro cuadrado, logran una retención de agua altamente efectiva. Las cuencas de retención en segundo lugar, ofrecen un equilibrio adecuado entre costos y beneficios en términos de retención. En tercer lugar, aunque los pavimentos permeables demuestran una efectividad del 70%, su costo por metro cuadrado es más elevado en comparación con los beneficios que generan.

Desde una perspectiva técnica, el proyecto se presenta como factible debido a los cambios significativos observados en la capacidad de las tuberías de las avenidas principales del sistema y reducción en el factor de inundación calculado. Los SUDS propuestos han sido diseñados de manera que no afecten el casco urbano, y se han evitado la implementación en terrenos cuyo uso futuro es incierto.

Para el cálculo que se realizó de la TIR de 1.92% indica que la tasa de rendimiento del proyecto es positiva. La TIR se compara generalmente con la tasa de descuento o el costo de oportunidad. La TIR positiva sugiere que el proyecto tiene un rendimiento superior al costo de oportunidad.

El VAN positivo de \$28,144,688.34 indica el valor presente de los flujos de efectivo futuros, descontado a una tasa del 1.92%, es mayor que la inversión inicial y cualquier otro costo asociado al proyecto. Esto respalda la idea de que el proyecto podría generar un valor económico neto.

La consideración del valor residual al año 15 es una práctica común en proyectos a largo plazo. Este valor residual generalmente refleja el valor de los activos al final del proyecto.

## Recomendaciones

A pesar de las reducciones evidenciadas en las capacidades de las tuberías de las avenidas principales, se identifican tramos en los que no se experimentan alteraciones, generando la circunstancia en la cual la infraestructura hidráulica opera continuamente a la máxima capacidad durante extensos periodos de tiempo. En este sentido, la propuesta de modificación de diámetro, combinada con la implementación de SUDS, podría significar una solución integral para mitigar un porcentaje más significativo de inundaciones.

Resulta relevante señalar que en el contexto mexicano no existe una normativa federal de alcance general que imponga en las empresas la instalación de sistemas específicos para el aprovechamiento de agua de lluvia. En este contexto, la mejora de la normativa vigente, mediante la introducción de disposiciones que promuevan un adecuado manejo de las aguas pluviales en los sectores inmobiliario, vial e industrial, se erige como una medida estratégica. Este enfoque no solo redundaría en beneficios para la administración pública, sino que también contribuiría al bienestar de la población al reducir los riesgos de inundaciones y fomentar las prácticas ambientales sostenibles.

Asimismo, se destaca la existencia de certificaciones ambientales y programas de construcción sostenible, entre ellos el Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). Estos instrumentos no solo proporcionan un marco reconocido internacionalmente para la implementación de prácticas sostenibles, sino que también pueden ofrecer incentivos y requisitos específicos para la adopción de tecnologías que aprovechen de manera eficiente el agua de lluvia. Integrar estas certificaciones en las políticas y regulaciones podría potenciar la adopción generalizada de enfoques más sostenibles en relación con la gestión del agua de lluvia pluvial.

La certificación LEED demuestra ser un instrumento sumamente pertinente y aplicable al sector industrial. “LEED for Industrial” emerge como una valiosa herramienta de evaluación y certificación, enfocada en el diseño y la construcción sostenibles de instalaciones industriales. Al igual que otras certificaciones LEED,

este enfoque otorga puntos en diversas categorías que abordan aspectos cruciales de la sostenibilidad, tales como la eficiencia energética, uso del agua, gestión de residuos, selección de materiales y calidad del entorno interior. Es particularmente efectiva para nuevas instalaciones industriales, facilitando mejoras sustanciales en su desempeño ambiental.

Cabe destacar que la aplicabilidad del LEED no se limita a nuevas construcciones, ya que también aborda la sostenibilidad de instalaciones ya existentes mediante el proceso de certificaciones LEED para Operaciones y Mantenimiento (LEED O + M). Este programa está diseñado con el propósito específico de evaluar y reconocer prácticas sociables sostenibles, así como el rendimiento ambiental continuo de edificios preexistentes.

En el contexto mexicano, la implementación de incentivos fiscales podría constituir una estrategia efectiva para fomentar prácticas sostenibles y la adopción de tecnologías limpias en el sector industrial. Estos incentivos podrían dirigirse a impulsar la eficiencia energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la adopción de tecnologías más amigables con el medio ambiente. Este enfoque no solo respaldaría los objetivos medioambientales, si no también contribuiría al fortalecimiento de la competitividad del sector industrial a nivel nacional.

Este proyecto no solo sienta las bases para la posible implementación de SUDS en la zona industrial, sino que también representa una plataforma abierta a diversas propuestas. La flexibilidad inherente a este planteamiento permite ajustes y modificaciones según las necesidades específicas, garantizando así que las soluciones propuestas alcancen los beneficios deseados tanto desde la perspectiva técnica como económica.

## Referencias

- «Valor residual de un proyecto» (B, García, comunicación personal, 11 de enero del 2023).
- Abellán, Ana. 2016. Sud Sostenible. [En línea] 2016. <http://sudsostenible.com/>.
- Altuve G. (2004). El uso del valor actual neto y la tasa interna de retorno para la valoración de las decisiones de inversión. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/257/25700902.pdf>
- Barbosa, R. (2018) Actualización del Atlas de Riesgo para el Municipio de San Luis Potosí y su zona conurbada. Recuperado de: [https://sanluisimplan.gob.mx/wp-content/uploads/programas\\_2021/atlas.pdf](https://sanluisimplan.gob.mx/wp-content/uploads/programas_2021/atlas.pdf)
- Bonem J.M. (2018) Chemical Scale Up How to go from laboratory to commercial. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02123-X>
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2023). Catálogo de costos directos de vivienda 2023.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2023). Catálogo de costos directos de carreteras 2023.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2023). Eco-Tecnologías y materiales sustentables
- Campos A. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. Recuperado de: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- Campos A. (2010). Introducción a la hidrología urbana. Recuperado de: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- Castro, D., Rodríguez, J., & Sañudo, L. (2012). Diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/257231993>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada (1a ed.). McGraw Hill.
- Circle Integral de l'Agua. (2021). *Guía Básica para el diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de Valencia*. Recuperado de: [https://www.ciclointegraldelagua.com/files/normativa/Guia\\_Basica\\_para\\_el\\_Dis](https://www.ciclointegraldelagua.com/files/normativa/Guia_Basica_para_el_Dis)

[eno de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de Valencia V02.pdf](#)

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Luis Potosí (2411), estado de San Luis Potosí, CONAGUA. [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/sanluispotosi/DR\\_2411.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sanluispotosi/DR_2411.pdf)
- Comisión Nacional del Agua. (2023). Proyecto tipo de presupuestos de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) y saneamiento básico a nivel vivienda en zonas rurales. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/792360/PROYECTOS\\_TIPO\\_Y\\_PRESUPUESTOS\\_SCALL\\_Y\\_SANEAMIENTO\\_BASICO\\_2023.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/792360/PROYECTOS_TIPO_Y_PRESUPUESTOS_SCALL_Y_SANEAMIENTO_BASICO_2023.pdf)
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2022). Geo portal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad [15,830] - CONABIO. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2022). Geo portal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad [15,830] - CONABIO. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). (2018). Agua y ciudad Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible – CONAMA [http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/STs%202018/10\\_preliminar.pdf](http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/STs%202018/10_preliminar.pdf)
- Contreras Servín C. & Galindo Mendoza M. 2008. Abasto futuro de agua potable, análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí, México. Cuadernos de Geografía – Revista Colombiana de Geografía. 17. pp: 127 – 137.
- Cortés, A., Ignacio, F. y Marengo-Mogollón, H. (2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353549829001>
- Coss, A. (1995). Análisis y evaluación de proyectos de inversión. Recuperado de: <https://pdfcoffee.com/analisis-y-evaluacion-de-proyectos-raul-coss-bu-pdf-free.html>

- Estrada, F. (2013) Agua de San Luis Potosí, contaminación y saneamiento. (Trabajo de grado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí) Recuperado de: <https://ninive.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/3456/IAZ1AGU01301.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García, G., March, M., M. Castillo., 2001, Transformación de la vegetación por cambio de uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Calakmul, Campeche, Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía UNAM.
- Iagua. (2015). Recuperado de: <https://www.iagua.es/blogs/licitacivil/proyecto-g-cans-alcantarillas-tokyo>
- IMPLAN. (2021). Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de San Luis Potosí, SLP. Gobierno Municipal de San Luis Potosí.
- Instituto de Estudios Sociales en Población (IDESPO). (2018). Universidad Nacional – IDESPO. [https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/14482/componentes\\_del\\_scall.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/14482/componentes_del_scall.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Jiménez, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A., & Díaz, M. (2019). A multicriteria planning framework to locate and select Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Consolidated Urban Areas. Sustainability, 11(2312), 33. <https://doi.org/10.3390/su11082312>
- Martín A. (2017) Estudio de económico de alternativas de redes de saneamiento en un entorno urbano. (Trabajo de grado, Universidad de Sevilla). Recuperado de: <https://idus.us.es/handle/11441/63707?show=full>
- Meyer, W.B. y Turner, B.L., 1994, Change in Land Use and Cover: a global perspective, Cambridge: Cambridge University.
- MINVU-DICTUC (1996). Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de diseño. Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Santiago, Chile.
- Nave Carrefour, Azuqueca de Henares (2019). DRENATURA. Recuperado de <https://www.drenatura.com/proyecto/nave-carrefour-azuqueca-de-henares/>

- Pérez L. (2017). Estudio para la construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en el Campus de Rabales en Córdoba. Recuperado de: <https://idus.us.es/handle/11441/70866>
- Pérez, N., Cisneros, R., Durán, H. (Revisión de la ocurrencia de inundaciones en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P. en el periodo 2014-2021. Recuperado de: <https://pdfcoffee.com/analisis-y-evaluacion-de-proyectos-raul-coss-bu-pdf-free.html>
- Peris-García, P.P., Perales-Momparler, S. (2016). La apuesta por la infraestructura verde urbana para la gestión de pluviales tiene premio. Comunicación técnica del Congreso Nacional de Medio Ambiente, CONAMA 2016: La respuesta es verde, 28 nov-2 dic, Madrid, España.
- Pineda Pastrana O. (2011) Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio del valle de Santiago (Trabajo de grado, Centro de investigación en geografía y geomática). Recuperado de: <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/41/1/21-2011-Tesis-Pineda%20Pastrana%2C%20Oliva%20Maestra%20en%20Geom%C3%A1tica.pdf>
- Planta Praxair, Vallecas (2017). DRENATURA. Recuperado de <https://www.drenatura.com/proyecto/planta-praxair-vallecas/>
- Rodríguez A. (2017) S.U.D.S. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, Hacia una gestión integral del ciclo urbano del agua. (Trabajo de grado, Universidad politécnica de Madrid). Recuperado de: [https://oa.upm.es/47528/1/TFG\\_Rodriguez\\_Arbelo\\_AntonioMiguel.pdf](https://oa.upm.es/47528/1/TFG_Rodriguez_Arbelo_AntonioMiguel.pdf)
- Rojas, Jhan & Bonilla, Carlos. (2021). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS): una alternativa integral para el manejo de las aguas lluvias. 11. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/351428579\\_Sistemas\\_urbanos\\_de\\_drenaje\\_sostenible\\_SUDS\\_una\\_alternativa\\_integral\\_para\\_el\\_manejo\\_de\\_las\\_aguas\\_lluvias](https://www.researchgate.net/publication/351428579_Sistemas_urbanos_de_drenaje_sostenible_SUDS_una_alternativa_integral_para_el_manejo_de_las_aguas_lluvias)
- STORMTECH®. (2023). DRENATURA. Recuperado de <https://www.drenatura.com/stormtech/>

- SUDS, Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible S.L. (2021). Recuperado de: <https://drenajesostenible.com/proyecto-suds-daganzo-madrid/>
- Washington State Department of Transportation. (2008). EPA. (1999). Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices.
- Woods Ballard, B, Wilson, Udale-Clarke, H, Illman, S, Scott, T, Ashley, R, Kellagher, R (2015). The SUDS manual CIRIA. Recuperado de: <http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf>
- Xiaoquian Y. (2020) Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible. (Trabajo de grado, Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos). Recuperado de: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/44115>