



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Ingeniería para el Desarrollo Municipal

**DISEÑO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN EL ÁREA URBANA DEL
MUNICIPIO DE CAJOLÁ, QUETZALTENANGO**

Ing. Roberto Huinil Mejía

Asesorado por el MSc. Ing. Roberto Enrique Galindo Calderón

Guatemala, abril de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN EL ÁREA URBANA DEL
MUNICIPIO DE CAJOLÁ, QUETZALTENANGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. ROBERTO HUINIL MEJÍA
ASESORADO POR EL MSC. ING. ROBERTO ENRIQUE GALINDO
CALDERÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO
MUNICIPAL**

GUATEMALA, ABRIL DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marvin Eduardo Mérida Cano
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE CAJOLÁ, QUETZALTENANGO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de enero de 2022.



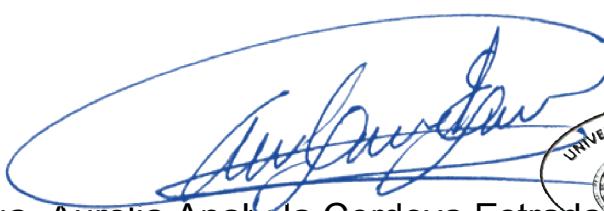
Ing. Roberto Huinil Mejía

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.444.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE CAJOLÁ, QUETZALTENANGO**, presentado por: **Ing. Roberto Huinil Mejía**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Ingeniería para el desarrollo municipal después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Decana

Guatemala, mayo de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, mayo de 2023

LNG.EEP.OI.444.2023

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“DISEÑO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN EL ÁREA URBANA
DEL MUNICIPIO DE CAJOLÁ, QUETZALTENANGO”**

presentado por **Ing. Roberto Huinil Mejía** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Ingeniería para el desarrollo municipal**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Dario Alvarez Cotí
Director



**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 8 de noviembre de 2022

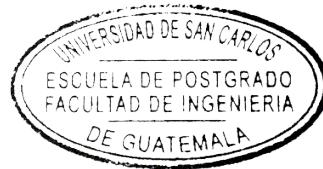
M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **DISEÑO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE CAJOLÁ, QUETZALTENANGO** del estudiante **Roberto Huinil Mejía** quien se identifica con número de carné **201130780** del programa de Maestría En Ingeniería Para El Desarrollo Municipal.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestría En Ingeniería Para El Desarrollo Municipal
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 08 de noviembre de 2022.

Ingeniero M.Sc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12

Distinguido Ingeniero Álvarez:

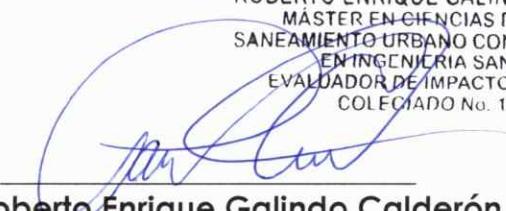
Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante Roberto Huinil Mejía, Carné número 201130780, cuyo título es "**DISEÑO DE UN PLAN DE GESTIÓN DE AGUAS PLUVIALES EN EL AREA URBANA DEL MUNICIPIO DE CAJOLÁ, QUETZALTENANGO**", para optar al grado académico de **Maestro en Ingeniería para el Desarrollo Municipal**, he procedido a la revisión del INFORME FINAL y del ARTÍCULO.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Huinil Mejía, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

Ingeniero Civil
ROBERTO ENRIQUE GALINDO CALDERÓN
MÁSTER EN CIENCIAS DFL AGUA Y
SANEAMIENTO URBANO CON ESPECIALIDAD
EN INGENIERÍA SANITARIA
EVALUADOR DE IMPACTO AMBIENTAL
COLEGIADO Nú. 11.790


Ing. Roberto Enrique Galindo Calderón.
Master en Ciencias del Agua y Saneamiento Urbano
Asesor

AGRADECIMIENTO A:

- Dios** Por la vida y por darme la fuerza y sabiduría necesaria para culminar esta meta.
- Mi familia** Porque siempre han sido motivo y apoyo en todo el proceso. ¡Muchas gracias!
- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por abrirme sus puertas hacia el aprendizaje y por culminar otra meta más.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XIII
OBJETIVOS	XVII
RESUMEN MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Información general del municipio	1
1.1.1. Organización actual del territorio	1
1.2. Servicios públicos	2
1.2.1. Servicios públicos municipales	2
1.3. Plan de gestión de aguas pluviales	3
1.3.1. Indicadores para evaluar el éxito en la implantación de la gestión de las aguas pluviales	4
1.3.2. Problemas ambientales	4
1.4. Ciclo hidrológico	5
1.5. Escorrentía	6
1.5.1. Fuentes de escurrimiento	6
1.5.2. Hidrograma y su análisis	7
1.6. Manejo de aguas de lluvia desde una perspectiva hidrológica	10

1.6.1.	Características de los drenajes en ámbitos urbanos	11
1.6.2.	Modelos hidrológicos e hidráulicos.....	14
1.6.3.	Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS.....	15
1.6.3.1.	Funcionamiento de los SUDS	18
1.6.3.2.	Principales tipos de SUDS	20
1.6.3.3.	Tipos de SUDS estructurales	20
1.7.	Modelación hidráulica.....	24
1.7.1.	Aspectos de la modelación.....	25
1.7.1.1.	Modelos.....	25
1.7.1.2.	Tipos de modelos	26
1.8.	Modelo de gestión de aguas pluviales	28
1.8.1.	EPA SWMM	29
1.8.1.1.	Aplicaciones	29
1.8.1.2.	Herramientas LID'S	30
1.9.	Marco jurídico y legislación en materia de aguas pluviales.....	32
1.9.1.	Competencia municipal establecida en el Código Municipal	33
1.9.2.	Funciones de los Consejos Comunitarios de Desarrollo	33
2.	METODOLOGÍA	35
2.1.	Tipo de estudio.....	35
2.2.	Evaluación del sistema de drenaje actual del área urbana	35
2.2.1.	Modelo hidrológico	35
2.2.1.1.	Delimitación de cuenca	36
2.2.1.2.	Zona de expansión.....	38
2.2.1.3.	Método lluvia escorrentía	38

2.2.1.4.	Parámetros subcuenca utilizados en la modelación SWMM.....	38
2.2.1.5.	Eventos de lluvia.....	39
2.2.1.6.	Modelo hidráulico.....	40
2.3.	Propuesta de manejo de agua de lluvia en el área urbana.....	42
2.3.1.	Propuesta 1	42
2.3.1.1.	Modelo hidrológico.....	42
2.3.1.2.	Delimitación de microcuenca	42
2.3.1.3.	Modelo hidráulico.....	43
2.3.1.4.	Propuesta de red de alcantarillado pluvial	44
2.3.2.	Propuesta 2	46
2.3.2.1.	Sistemas de drenaje sostenible a implementar.....	47
2.3.2.2.	Microcuenca con SUDS implementados	51
2.4.	Propuesta de gestión de las aguas pluviales del área urbana del municipio de Cajolá.....	52
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	53
3.1.	Situación actual del sistema de drenaje pluvial en el área urbana del municipio de Cajolá.	53
3.2.	Propuesta de manejo de agua pluvial en el área urbana	58
3.3.	Gestión de aguas pluviales en el área urbana del municipio de Cajolá	66
3.3.1.	Gestión actual del servicio de drenaje	67
3.3.2.	Priorización de gestión	68

3.3.3. Propuesta de modelo de gestión de aguas pluviales en el área urbana del municipio de Cajolá	69
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	75
4.1. Situación actual del sistema de drenaje pluvial en el área urbana	75
4.2. Propuesta de manejo del agua pluvial en el área urbana.	76
4.3. Gestión de aguas pluviales en el área urbana del municipio de Cajolá	78
CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES	83
REFERENCIAS.....	85
ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo hidrológico	6
2.	Hidrograma promedio mensual	8
3.	Hidrograma aislado	9
4.	Dinámica del agua de lluvia en áreas urbanas.....	13
5.	Ejemplo de hidrogramas de escorrentía de una cuenca en diferentes fases de desarrollo urbano.....	16
6.	Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía.....	18
7.	Componentes de un modelo	26
8.	Escala temporal característica de la modelación de la dinámica del agua para determinados fines.....	27
9.	Área total de la microcuenca que drena hacia el área urbana.	37
10.	Curvas IDF típicas de la estación climática Labor Ovalle.....	39
11.	Hietograma lluvia TR 10 años	40
12.	Sección típica de calle.....	41
13.	Microcuenca con condición modificada que drena por el área urbana	43
14.	Microcuenca delimitada por zonas de descarga	44
15.	Colectores propuestos en el área urbana	45
16.	Hidrogramas de salidas.....	54
17.	Caudal simulado en calles situación actual.....	55
18.	Tirante en las salidas	56
19.	Relación nivel de agua y caudal salida 1	56

20.	Nivel agua simulado en las calles.....	57
21.	Ubicación de SUDS	58
22.	Hidrograma de salida 1	59
23.	Caudal en sistema de colectores propuesta 1	60
24.	Caudal en sistema de colectores propuesta 2	61
25.	Capacidad hidráulica colector Tub-63.....	62
26.	Capacidad hidráulica e inundación en pozos propuesta 1	63
27.	Capacidad hidráulica e inundación en pozos en propuesta 2	64
28.	Velocidad en colectores en la propuesta 1	65
29.	Velocidad en colectores propuesta 2	66

TABLAS

I.	Prácticas de modelado de SWMM genéricas de infraestructura verde...	31
II.	Prácticas de modelado de SWMM genéricas de infraestructura verde...	48
III.	Pavimento permeable	48
IV.	Almacenamiento de lluvia	49
V.	Zanja de infiltración.....	50
VI.	Techo verde.....	50
VII.	Desempeño de la cuenca actual.....	53
VIII.	Desempeño de la microcuenca	59
IX.	Plan de gestión del sistema de drenaje pluvial	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Caudal
Q_b	Caudal base
Q_p	Caudal máximo
n	Coeficiente de Manning
D	Duración de lluvia neta
ha	Hectárea
I	Intensidad de lluvia
L/s	Litro sobre segundo
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
m	Metros
mm	Milímetro
Min	Minutos
Tr	Período de retorno
PVC	Policloruro de vinilo
%	Porcentaje
t	Tiempo
T_b	Tiempo base
T_c	Tiempo de concentración
T_{dp}	Tiempo de desfase a la punta
T_p	Tiempo de pico

GLOSARIO

CAP	Centro de atención permanente, se ubican en áreas geográficas seleccionadas, con centros urbanos de alta concentración poblacional (mayor de 20,000 habitantes) o comunidades rurales de difícil acceso.
Detención	Almacenamiento temporal de la escorrentía y descarga laminada de esta a la red o punto de vertido.
Filtración	Retención de sedimentos presentes en el agua de lluvia mediante procesos físicos.
Hidrograma	Representación gráfica de las variaciones del caudal con respecto al tiempo.
Infiltración	Se favorece el flujo vertical y la recarga de acuíferos, permitiendo que la escorrentía fluya a través del subsuelo.
Parterres	Es un diseño de un jardín formal a nivel del suelo que está formado por flores o hierbas, que está delimitado por generalmente arbustos.
Punto de inflexión	Es aproximadamente cuando termina el flujo sobre el terreno.

Punto de levantamiento En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca.

Retención Almacenamiento a medio plazo de la escorrentía para usos no potables o recreativos.

SUDS Los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) son técnicas de gestión de aguas pluviales y planeamiento urbano que pretender imitar procesos hidrológicos en el desarrollo urbanístico.

Tiempo base Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo.

Tiempo de pico Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma.

RESUMEN

La gestión de las aguas pluviales consiste en una serie de acciones encaminadas para su correcto manejo y control, considerando factores sociales, económicos, ambientales, infraestructura, entre otros. Con la gestión se pretende mitigar los impactos negativos que genera la escorrentía pluvial en las áreas urbanas, puesto que en la mayoría de las ciudades o centros poblados no se ha contemplado este tema que ahora los afecta.

En el área urbana del municipio de Cajolá se le ha dado poca importancia al tema del agua pluvial, aunado a esto, actualmente se genera una serie de problemas relacionados principalmente con inundaciones. Por tal motivo en el presente estudio se hizo un diagnóstico del sistema de drenaje pluvial actual para determinar su funcionamiento y la capacidad que éste tiene ante eventos de lluvia, por un *software* llamado Storm Water Management Model (SWMM), desarrollado por la Agencia para la Protección del Ambiente en Estados Unidos (EPA).

Actualmente el área urbana del municipio de Cajolá carece de un sistema de alcantarillado pluvial, por lo que las calles están destinadas para el transporte de la escorrentía hacia los puntos de descarga, esta sección de calles varía en todo el trayecto y no tienen la capacidad hidráulica para transportar caudales que puede generar una lluvia de diseño con un periodo de retorno de 10 años.

Como resultado del diagnóstico se plantearon alternativas de manejo de estas aguas en el área urbana las cuales consisten en una primera propuesta de un sistema de alcantarillado pluvial encargado del transporte de la escorrentía

hasta los puntos de descarga identificados, y la segunda propuesta que consíste en la misma red de alcantarillado pluvial más la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en áreas identificadas para su implementación, ambas propuestas simuladas en SWMM.

Con la propuesta del sistema de alcantarillado pluvial se logra desfogar hacia los puntos de descarga, llegando al límite la capacidad hidráulica en algunos tramos de los colectores, mientras que con la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible con los mismos parámetros hidráulicos del anterior el comportamiento hidráulico mejora, logrando una disminución del caudal máximo en un 26.5 % en este sistema.

También se planteó un modelo de gestión de las aguas pluviales, analizando la gestión actual del sistema, luego se identificaron las principales debilidades, donde se plantearon acciones para una gestión del servicio eficiente y de calidad y que a su vez sea sostenible.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Cajolá, del departamento de Quetzaltenango no cuenta con un plan para el manejo de las aguas pluviales lo cual aunado a las precipitaciones que han venido ocurriendo en los últimos años ha generado una serie de problemas principalmente inundaciones en las partes bajas del municipio. Este problema es más notorio en el casco urbano del municipio ya que ha causado el colapso de los sistemas de drenaje, así como gran acumulación de agua de lluvia en las principales calles del casco urbano, evidenciando así el nulo manejo de las aguas pluviales. Mientras una gestión planificada del agua de lluvia mitiga y previene dichos desastres, porque esta contempla acciones encaminadas a un servicio eficiente y de calidad.

La red de drenajes del casco urbano del municipio no cuenta con un sistema separativo, lo que incita a la generación de conexiones ilícitas de agua de lluvia a la red actual, y dado el crecimiento urbano acelerado de los últimos años es evidente que la capacidad hidráulica y el periodo de diseño se ha sobrepasado considerando además la vida útil de los materiales (mayormente tubería de concreto), por lo que cada vez se requiere de mantenimiento correctivo con mayor frecuencia.

Muchos son los factores que hacen que el problema sea más complejo de manjar o controlar, el cambio de uso de suelos en los proyectos de infraestructura es uno de ellos, los cuales no son planificados de una manera integral en el cual no se contempla el manejo de las aguas de lluvia, y con dichos proyectos se está cambiando el uso de suelos a suelos impermeables, lo que genera mayor escorrentía superficial en menor tiempo.

Aunado al problema del mal manejo de las aguas pluviales uno de los principales efectos es la inundación de las partes bajas y las correntadas que recorren las principales calles del casco urbano lo cual imposibilita el paso peatonal y vehicular, y que en ocasiones genera pérdidas al sector productivo e infraestructura principalmente daños a viviendas que se ubican a cercanías del cauce natural del río. Otro de los principales efectos que genera este problema es el daño ocasionado en el suministro de agua potable y daño a la red de drenaje generando vectores por la expulsión de aguas combinadas (residuales y pluviales) que compromete la salud de la población, y acorta la vida útil del sistema actual.

Este estudio se analizará el comportamiento del sistema actual de la red de drenaje pluvial del área urbana del municipio de Cajolá del departamento de Quetzaltenango, en base a los resultados se propone sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para el manejo y control de las aguas pluviales, y por último se propone un modelo de gestión para la prestación de este servicio.

- Preguntas de investigación
 - Principal
 - ¿Cómo es el diseño de un plan de gestión de las aguas pluviales del área urbana del municipio de Cajolá, Quetzaltenango?
 - Secundarias
 - ¿Cuál es la condición actual del sistema de drenaje del área urbana del municipio de Cajolá, Quetzaltenango?

- ¿Qué sistemas se pueden implementar de los sistemas urbanos de drenaje sostenible para el manejo pluvial del área urbana del municipio de Cajolá?
- ¿Cómo es el plan de gestión de aguas pluviales del área urbana del municipio de Cajolá?

OBJETIVOS

General

Diseñar un plan de gestión para el manejo de las aguas pluviales del área urbana del municipio de Cajolá, Quetzaltenango.

Específicos

1. Evaluar el sistema de drenaje pluvial actual del área urbana del municipio de Cajolá, Quetzaltenango.
2. Proponer alternativas de manejo del agua pluvial que incluyan sistemas urbanos de drenaje sostenible.
3. Formular un plan de gestión de aguas pluviales a nivel urbano del municipio de Cajolá.

RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

En la primera fase del estudio se hizo un levantamiento de información de obras de infraestructura de drenaje, logrando con ello identificar ríos, quebradas, drenaje transversal, y la identificación de la inexistencia de un sistema de alcantarillado pluvial. Luego del levantamiento de información base se realiza una simulación del sistema actual, a través del software EPA SWMM, esto con el fin de determinar el comportamiento hidrológico e hidráulico ante eventos de lluvia.

Se hizo la delimitación de la microcuenca que drena hacia el área urbana a partir de un modelo de elevación digital, con revisión y modificación manual para aproximarse al sistema actual. Para el método de lluvia-escorrentía se usó el método Soil Conservation Service (SCS). Se usaron los parámetros siguientes de subcuenca para el modelo en SWMM: ancho del área tributaria, almacenamiento de zona permeable e impermeable, coeficiente de Manning para zonas permeables e impermeables, porcentaje de área impermeable y pendiente.

Para la lluvia de diseño se utilizaron los parámetros de curvas IDF de la estación más cercana al área de estudio, donde se construyó con el método del bloque alterno el hietograma de diseño para una duración de 45 minutos y delta de tiempo de 3 minutos, considerando un periodo de retorno (Tr) 10 años.

Los parámetros hidráulicos considerados son de un canal abierto, dado la inexistencia de una red de alcantarillado pluvial se toma la sección de calle, donde se considera lo siguiente: material y n de Manning, cota invert de inicio y llegada, para el modelo actual no se consideraron perdidas ni calidad de agua.

En la segunda fase se construyeron dos modelos para el manejo de aguas pluviales, donde se consideraron dos propuestas que se evaluaron bajo las mismas condiciones. La propuesta uno se basa en una red de alcantarillado pluvial (colectores) de diámetro mayor a 450 mm, y en la propuesta dos se considera la misma red de alcantarillado y sumado a ello se consideraron sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), ambos modelos considerando los mismos parámetros hidrológicos e hidráulicos. parámetros de subcuenca, lluvia de diseño, y de conducto.

Para la identificación de los SUDS a implementar en la propuesta dos, se revisó en cada subcuenca el espacio disponible para la implementación y los parámetros requeridos por cada sistema.

Para este modelo se hizo una nueva delimitación de cuenca, considerando puntos de descarga en la parte norte de la cuenca, ya que actualmente existe un drenaje transversal existente que se encuentra en desuso. Por lo tanto, en el modelo de gestión se considera la rehabilitación de este punto de descarga, disminuyendo con ello el área de la subcuenca en esta fase.

En la tercera fase del estudio se define un modelo de gestión para la prestación del servicio para lograr un servicio sostenible.

INTRODUCCIÓN

No contar con un plan de manejo de aguas pluviales en áreas urbanas genera una serie de problemas que tienen efectos sobre la población, ya que se compromete la infraestructura urbana y en general patrimonio privado y público. La conexión a una red de drenaje combinado existente que ha cumplido con el periodo de diseño y periodo de vida útil de los materiales son problemas que se agravan con el tiempo, considerando que el cambio o mejoramiento de este sistema obsoleto con sistemas de ingeniería tradiciones en un área desarrollada contempla un costo muy elevado.

En el capítulo uno se hace una revisión bibliográfica para abordar los conceptos necesarios que permitan la comprensión y el análisis del estudio donde se abordan conceptos desde información relevante del municipio, servicios públicos, la gestión del agua pluvial, el ciclo hidrológico, los sistemas urbanos de drenaje sostenible, y la base legal entorno al municipio.

En el capítulo dos, se desarrolla la metodología implementada para el desarrollo del estudio, desde la obtención de la información del sistema de drenaje pluvial con que cuenta el área urbana del municipio actualmente. Se analizó el comportamiento hidráulico del sistema actual a través de un *software* libre de modelo de gestión de aguas pluviales (EPA SWMM), luego se modeló la red pluvial aplicando sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) el cual se incluyen tipologías que se podría implementar en el área urbana para demostrar el cambio que se puede lograr con dichos sistemas.

Además de considerar sistemas urbanos de drenaje sostenible que se puedan implementar en el área y demostrar a través de la modelación los resultados que se podrían obtener implementando estos sistemas. Se analiza y presenta un modelo de gestión orientado a la prestación de un servicio sostenible del sistema de drenaje pluvial en el área urbana del municipio de Cajolá.

En el capítulo tres se presentan los resultados obtenidos de la modelación del sistema actual, y de las propuestas implantadas para el análisis. Y en el capítulo cuatro se hace una interpretación de los resultados presentados en el capítulo tres.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Información general del municipio

Para Municipalidad de Cajolá (2019):

Cajolá se localiza en el departamento de Quetzaltenango, su extensión es de 36 km² y es uno de los municipios de menor extensión de Quetzaltenango.

Al norte limita con los municipios de Sibilia y San Carlos Sija, al sur con San Miguel Sigüilá y San Juan Ostuncalco, al este con San Mateo y San Francisco La Unión, y al oeste con Palestina de Los Altos; todos en el departamento de Quetzaltenango.

La altura promedio es de 2,510 metros sobre el nivel del mar (msnm), por lo que el clima predominante durante la mayor parte del año es frío. Se encuentra a 217 km de la capital de Guatemala. (p. 4)

1.1.1. Organización actual del territorio

De acuerdo con los datos proporcionados por la municipalidad, el territorio está dividido en cabecera municipal, dos aldeas (Cajolá Chiquito y Xetalbiloj), el cantón Xecol y 29 caseríos. Del total de lugares poblados, 24 tienen COCODES que cuentan con representantes acreditados en el COMUDE (Municipalidad de Cajolá, 2019).

Para Municipalidad de Cajolá (2019):

La cabecera municipal, Cajolá Chiquito y Xecol son identificados como centralidades, esto por los servicios que le ofrecen a la población, dos de ellas se encuentran en la parte sur del municipio y la otra en el noreste, en el límite con San Carlos Sija.

El casco urbano tiene la mayoría de los servicios para los habitantes del municipio, por eso es la primera centralidad. Los pobladores se dirigen a la cabecera municipal por actividades comerciales formales e informales, educación básica, diversificada y salud; en este lugar se encuentra el Centro de Atención Permanente (CAP) y representa la única infraestructura de salud en todo el territorio de Cajolá. (p. 6)

1.2. Servicios públicos

Los servicios públicos son el conjunto de actividades técnicas que realiza la administración pública de manera uniforme, cumpliendo con los principios de generalidad, regularidad, continuidad e igualdad, para satisfacer las necesidades básicas de la población, y lograr así el bienestar colectivo o bien común. (Cifuentes, 2018, p. 11)

1.2.1. Servicios públicos municipales

El municipio debe regular y prestar los servicios públicos municipales de su circunscripción territorial y, por lo tanto, tiene competencia para establecerlos, mantenerlos, ampliarlos y mejorarlos, garantizando un funcionamiento eficaz, seguro y continuo (Decreto Numero 12-2002,2002).

1.3. Plan de gestión de aguas pluviales

Según García, Ibáñez, y Mosqueira (2012):

Comprende las acciones que se proponen para poder medir los impactos y en base a ello definir medidas preventivas o correctivas con el objetivo de mitigar o prevenir impactos generados por las aguas de lluvia.

Los primeros pasos para llevar a cabo este tipo de gestión consistirían en establecer un diagnóstico certero de la situación actual, identificar a todos los agentes y actores interesados y establecer entre todos ellos un programa de necesidades realista para alcanzar unos objetivos consensuados.

Las deficiencias y las necesidades detectadas podrían clasificarse en tres tipos: sociales, económicas y medioambientales. (p.113)

Principales tipos de gestión de aguas pluviales según García, Ibáñez, y Mosqueira (2012):

- A gran escala, a través de grandes actuaciones que pueden modificar completamente la filosofía del drenaje existente en una determinada zona: nuevas infraestructuras de drenaje convencionales, implementación de SUDS, modificación del sistema de recogida y tratamiento de las pluviales.
- A pequeña escala, a través de acciones individuales o colectivas adaptadas a los esquemas de drenaje existentes: actividades formativas y de concienciación, fomento de las desconexiones

individuales de las redes, incentivos a la implantación de cubiertas verdes, entre otras. (p. 114)

1.3.1. Indicadores para evaluar el éxito en la implantación de la gestión de las aguas pluviales

Según García, Ibáñez, y Mosqueira (2012):

La elección de los indicadores depende en gran medida de los objetivos que se establezcan entre las partes, de tal modo que cada objetivo debería estar asociado a un indicador. Principales Indicadores:

- La frecuencia en las inundaciones urbanas y sus repercusiones económicas por habitante y año.
- El estado ecológico de las masas de agua receptoras.
- La reducción en la demanda de agua potable.
- Porcentaje de población a favor del nuevo modelo de gestión.
- Incremento en el valor catastral del suelo. (p. 117)

1.3.2. Problemas ambientales

Centanaro (2020) afirma que “los principales problemas ocurren principalmente por los grandes picos de caudal, que, directamente causan erosión y aumentan el transporte de sedimentos, lo cual, a su vez, produce obstrucción de canales y pérdida de la vegetación” (p. 4).

1.4. Ciclo hidrológico

Chow, Maidment y Mays (1994) mencionan que “el agua circula en la hidrosfera a través de un laberinto de caminos que constituye el ciclo hidrológico” (p. 2).

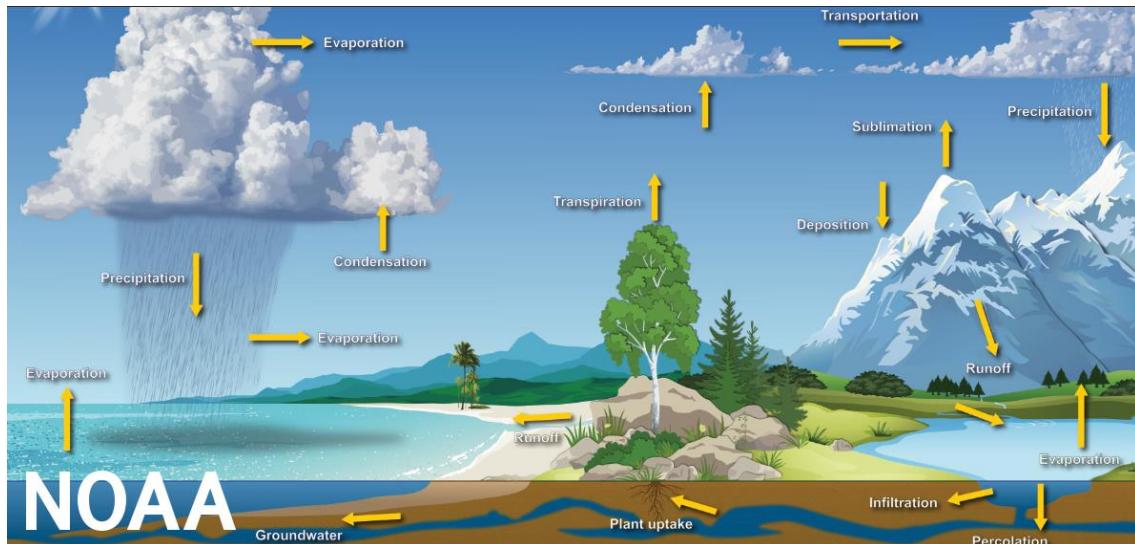
El ciclo del agua muestra el movimiento continuo del agua dentro de la Tierra y la atmósfera. Es un sistema complejo que incluye muchos procesos en diferentes estados y medios (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2019).

El agua líquida se evapora, se concentra para formar nubes y vuelve a precipitarse a la tierra en forma de lluvia o nieve. En varias fases el agua se mueve en la atmósfera (transporte) (NOAA, 2019).

También fluye a través de la tierra (escorrentía), hacia el suelo (infiltración y percolación) y a través del suelo (agua subterránea). Mientras parte del agua subterránea pasa a las plantas (absorción de las plantas) luego se evapora de las plantas a la atmósfera (transpiración) (NOAA, 2019).

Mientras el agua en estado sólido puede convertirse directamente en gas (sublimación). También puede ocurrir lo contrario cuando el agua en estado sólido se solidifica (deposición) (NOAA, 2019).

Figura 1. Ciclo hidrológico



Fuente: NOAA (2019). *Water cycle*.

1.5. Escorrentía

La escorrentía es el agua de lluvia el cual fluye en la superficie terrestre y va al primer cuerpo receptor que encuentra en su trayecto, o una parte de él se infiltra en el suelo (Centanaro, 2020).

1.5.1. Fuentes de escurrimiento

Para Mendez (2014):

Cuando la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie.

Este escurrimiento, llamado flujo en la superficie del terreno, se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos (es decir, que no desaparecen entre dos tormentas sucesivas).

En su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre el terreno se sigue infiltrando, e incluso se evapora en pequeñas cantidades. Una vez que llega a un cauce bien definido se convierte en escurrimiento en corrientes. (p. 9)

1.5.2. Hidrograma y su análisis

Para Bustamante (2018):

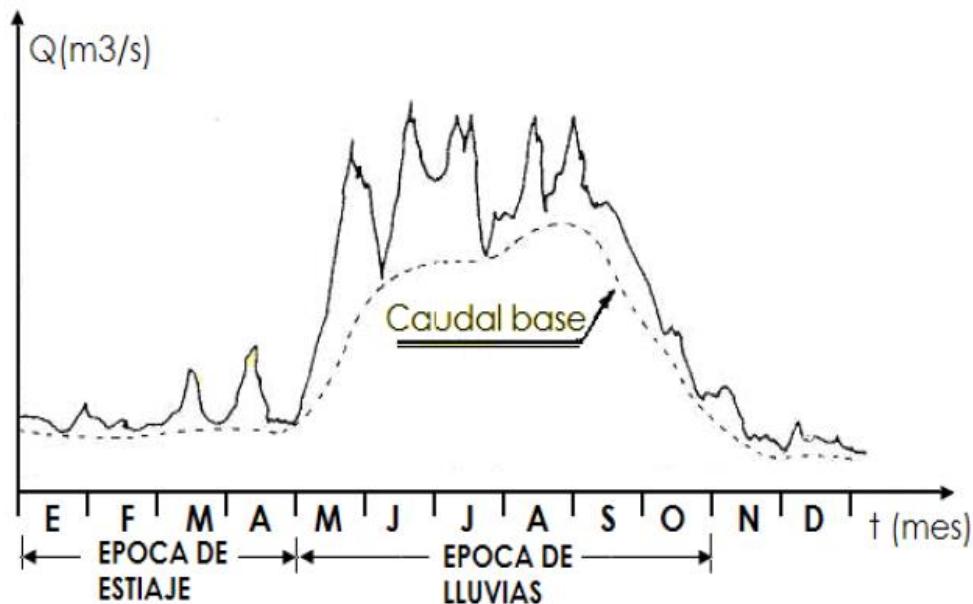
El hidrograma, es la representación gráfica de las variaciones del caudal con respecto al tiempo, en orden cronológico, en un lugar dado de la corriente.

El área bajo el hidrograma es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo, en el intervalo de tiempo expresado en el hidrograma. (pp. 14-15).

Se puede graficar una tormenta aislada o una sucesión de ellas (hidrograma anual), tal como se presenta en la figura 2. “En donde se representa un hidrograma anual; donde si la escala del tiempo se amplía de tal manera que se pueda observar el escurrimiento producido por una sola tormenta” (Cahuana y Yugar, 2009, p. 174).

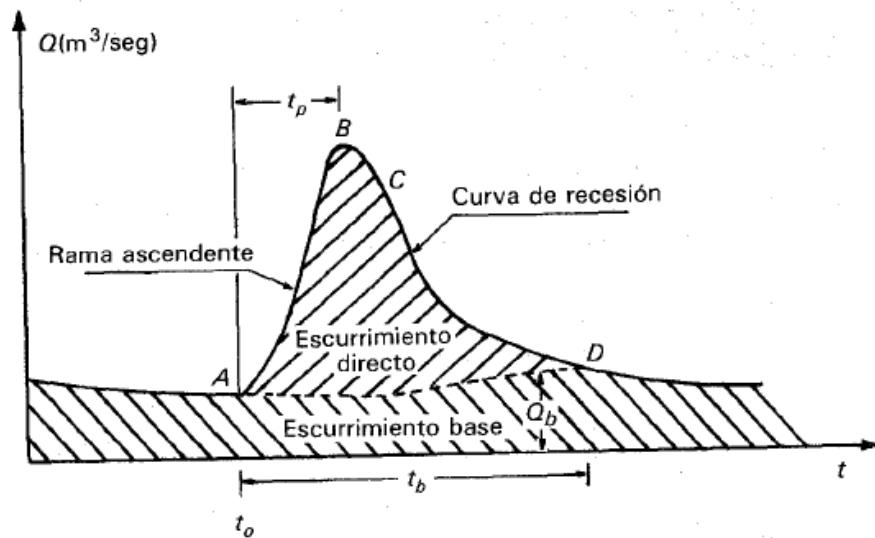
“La forma de los hidrogramas producidos por eventos aislados varía no sólo de una cuenca a otra sino también de un evento a otro evento de lluvia” (Cahuana y Yugar, 2009, p. 174).

Figura 2. **Hidrograma promedio mensual**



Fuente: Cahuana y Yagar (2019). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233.*

Figura 3. Hidrograma aislado



Fuente: Aparicio (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*.

Aparicio (1992) indica que en un hidrograma aislado se puede encontrar siguientes partes que compone esta gráfica:

- A: punto de levantamiento. En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta.
- B: pico. Es el gasto máximo que se produce por la tormenta. Con frecuencia es el punto más importante de un hidrograma para fines de diseño.
- C: punto de inflexión. En este punto es aproximadamente cuando termina el flujo sobre el terreno, y, de aquí en adelante, lo que queda

de agua en la cuenca escurre por los canales y como escurrimiento subterráneo.

- D: final del escurrimiento directo. De este punto en adelante el escurrimiento es sólo de origen subterráneo. Normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión, aunque pocas veces se distingue de fácil manera.
- T_p : tiempo de pico. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma.
- T_b : tiempo base. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo. Es, entonces, el tiempo que dura el escurrimiento directo.
- Rama ascendente. Es la parte del hidrograma que va desde el punto de levantamiento hasta el pico.
- Rama descendente o curva de recesión. Es la parte del hidrograma que va desde el pico hasta el final del escurrimiento directo. Tomada a partir del punto de inflexión, es una curva de vaciado de la cuenca.
(p. 175)

1.6. Manejo de aguas de lluvia desde una perspectiva hidrológica

“El conocimiento de la hidrología de la zona es el punto de partida para poder llevar a cabo una gestión responsable de las aguas pluviales en entornos urbanos” (Garcia, Ibáñez, y Mosqueira, 2012, p. 12).

En tal sentido es necesario analizar los aspectos claves, según García, Ibáñez, y Mosqueira (2012):

Las principales componentes del ciclo hidrológico aguas arriba del entorno urbano que se pretende gestionar: precipitaciones, evapotranspiración, escorrentías y las infraestructuras existentes que pueden alterar su comportamiento natural.

Estos datos permiten determinar qué volúmenes de agua externos al ámbito concreto de estudio hay que gestionar en ese entorno urbano, pero también pueden condicionar la capacidad de desaguar las aguas recogidas en el entorno urbano y las condiciones en las que se pueden realizar las descargas al medio receptor.

El comportamiento hidrológico del propio entorno urbano. Aquí cada cubierta, cada calle, cada plaza se convierte en una subcuenca hidrográfica, con una determinada permeabilidad y cuya escorrentía hay que gestionar. La escala aumenta por lo que los métodos de análisis tienen que ser más precisos.

Además, el drenaje de estas aguas se suele realizar a través de una red de tuberías cuyo comportamiento hidráulico e hidrológico también hay que conocer. (p.12)

1.6.1. Características de los drenajes en ámbitos urbanos

Un sistema de drenaje urbano contempla los siguientes aspectos:

Según García, Ibáñez, y Mosqueira (2012):

El medio físico e hidrológico, constituido por varias cuencas vertientes en las que se incluyen los ríos, torrente e infraestructuras urbanas (red de colectores, calles) que drenan las aguas de escorrentía pluvial que afecta al territorio urbano.

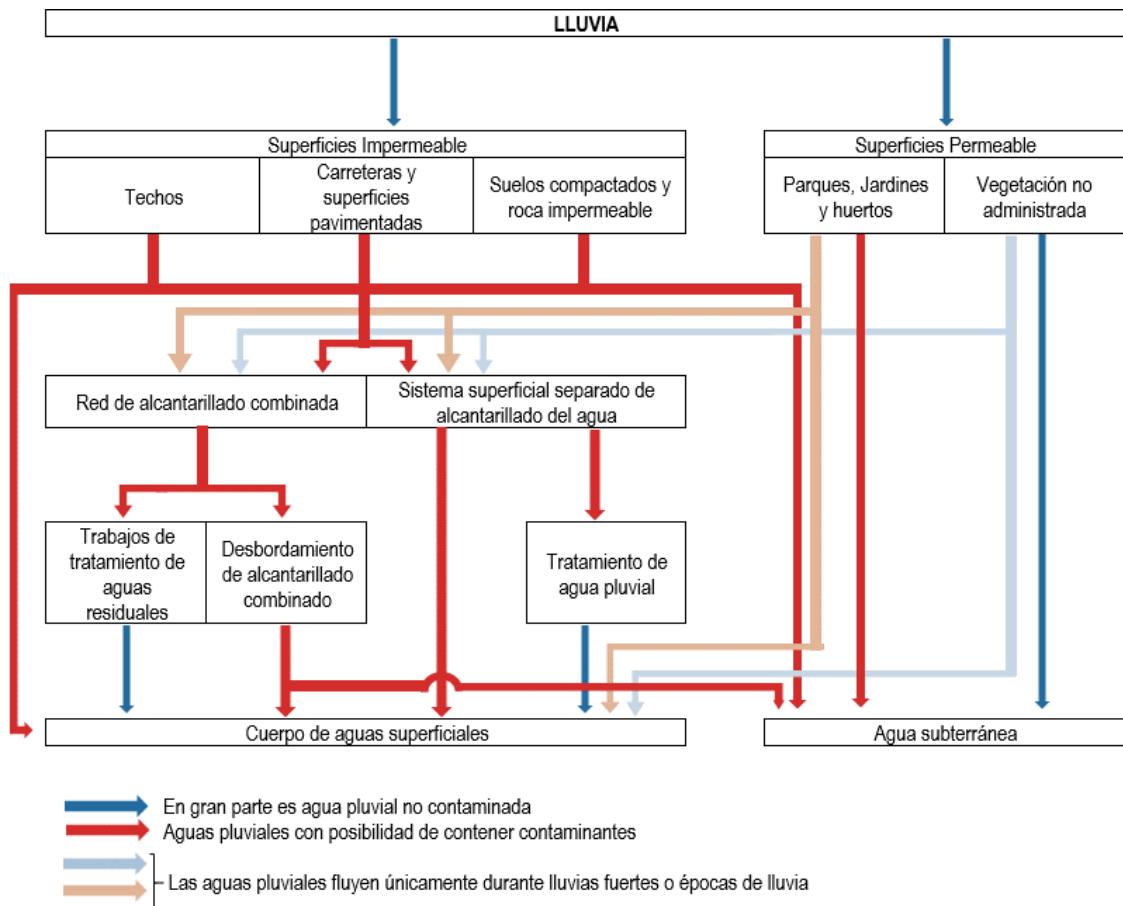
Procesos hidrológicos e hidráulicos asociados a la lluvia: generación de la lluvia, transformación lluvia escorrentía y transporte del caudal a través de la red de drenaje al medio receptor o filtración al terreno.

Por tanto, es necesario disponer en zonas urbanas de redes de medidas pluviométricas (lluvias) y foronómicas (caudales o calados en colectores) suficientemente amplias y distribuidas por toda su superficie.

Además es necesario caracterizar pormenorizadamente cada cuenca urbana (usos del suelo) y conocer en profundidad la red de drenaje y saneamiento (secciones, pendientes, pozos, aliviaderos, entre otros.).

Por ello, si no se dispone de dispositivos de medida y se desconoce físicamente la red, se obtendrán mediante los métodos de análisis de los procesos hidrológicos e hidráulicos aproximaciones groseras del funcionamiento de sistema de drenaje y riesgo de inundación. (p.13)

Figura 4. Dinámica del agua de lluvia en áreas urbanas



Fuente: García, Ibáñez, y Mosqueira (2012). *Análisis crítico de la problemática y las soluciones adoptadas a nivel europeo en la gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos*.

“Para poder prever el comportamiento del sistema de drenaje frente a la lluvia es necesario conocer su comportamiento y acometer las medidas oportunas para frenar sus consecuencias” (García, Ibáñez, y Mosqueira, 2012, p. 15).

“Toda esta información permitirá un análisis hidrológico e hidráulico adecuado para avanzar en el conocimiento del sistema de drenaje, pudiendo ser

suficiente para la identificación de problemas y evaluación de soluciones" (Garcia, Ibáñez, y Mosqueira, 2012, p. 15).

"Para el estudio del drenaje urbano es necesario conocer en gran medida por la disponibilidad (en cantidad y calidad) los datos de lluvia y grado de conocimiento de la cuenca" (Garcia, Ibáñez, y Mosqueira, 2012, p. 15).

1.6.2. Modelos hidrológicos e hidráulicos

Para Garcia, Ibáñez, y Mosqueira (2012):

En el manejo de las aguas pluviales en espacios urbanos es indispensable conocer los modelos matemáticos con los que se cuenta, principalmente para la transformación lluvia-escorrentía (modelos hidrológicos) como de transporte y laminación de flujo (modelos hidráulicos).

Por lo que, para poder instrumentalizar estos modelos, es importante que implementar, dentro del sistema de drenaje, una red de medición de caudales y niveles de agua, en los puntos de mayor relevancia.

Al implementar estos modelos no hay que centrarse únicamente en las redes de drenaje, sino que hay que tener en cuenta que esas redes y el entorno urbano al que dan servicio forman parte de un ámbito territorial mayor, la cuenca hidrográfica a la que pertenecen.

La interacción entre las redes o cualquier otro sistema de drenaje, con una capacidad para transportar caudal limitada, y los medios

receptores, con una capacidad limitada para recibir caudales, condiciona la aparición de inundaciones urbanas. (p. 15)

1.6.3. Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS

Para Universidad de Alicante (2020):

El efecto más característico del proceso de urbanización es la impermeabilización del suelo, que altera el ciclo hidrológico natural, especialmente el modelo de transformación de la lluvia en escorrentía.

La impermeabilización del suelo incide significativamente en el balance infiltración-escorrentía, al disminuir la capacidad de infiltración del terreno y, consecuentemente, aumentar los caudales de escorrentía.

La infiltración que ocurre en un área natural está entre el 80-90 % de la precipitación, mientras en una zona residencial la infiltración está en el rango del 50-60 %, y para un área altamente urbanizada la infiltración es menor al 10 %.

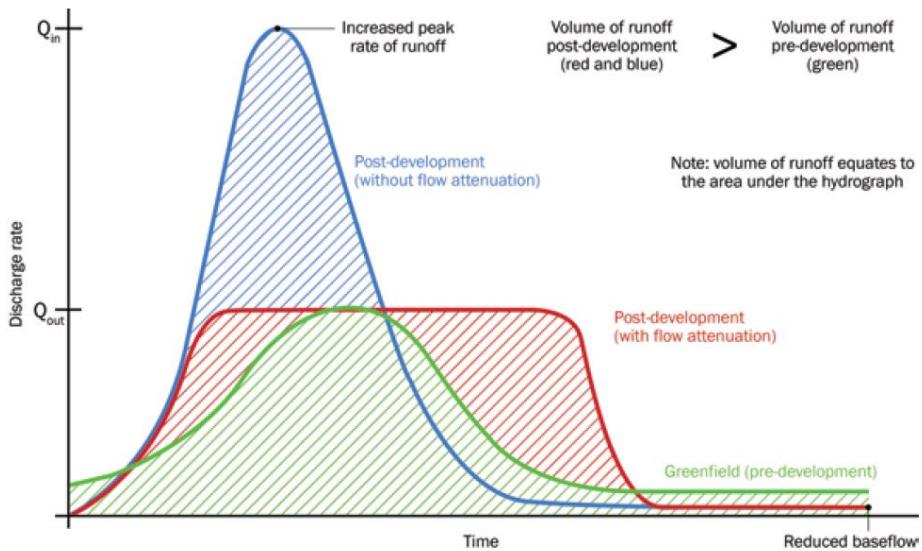
Los denominados Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) contribuyen a paliar los efectos adversos de la urbanización, ya que permiten recuperar, al menos parcialmente, las características naturales de infiltración del suelo. (p. 12)

En base al estado de la urbanización, en la figura 5 se logra observar varios hidrogramas de una misma cuenca.

“En la fase previa de desarrollo de la urbanización (*pre-development, greenfield*), tras el desarrollo urbano sin SUDS (*post-development, without flow attenuation*) y urbanizada con la implantación de SUDS para el control de puntas y protección frente inundaciones (*with flow attenuation*)” (Construction Industry Research and Information Association [CIRIA], 2015, p. 39).

El caudal punta es el mismo tanto en la fase antes del desarrollo urbano como en la fase posterior al mismo, con los sistemas urbanos de drenaje sostenible la diferencia de áreas de ambos hidrogramas indica un incremento de volumen de la escorrentía debido a la urbanización (CIRIA, 2015).

Figura 5. Ejemplo de hidrogramas de escorrentía de una cuenca en diferentes fases de desarrollo urbano



Fuente: CIRIA (2015). *The SuDS Manual*.

En la figura 6, “se presenta un hidrograma de respuesta de una cuenca, antes y después de ser urbanizada, ante un evento de precipitación de duración

de intensidad I variable (pluviograma de la parte superior de la figura)" (Universidad de Alicante, 2020, p. 14).

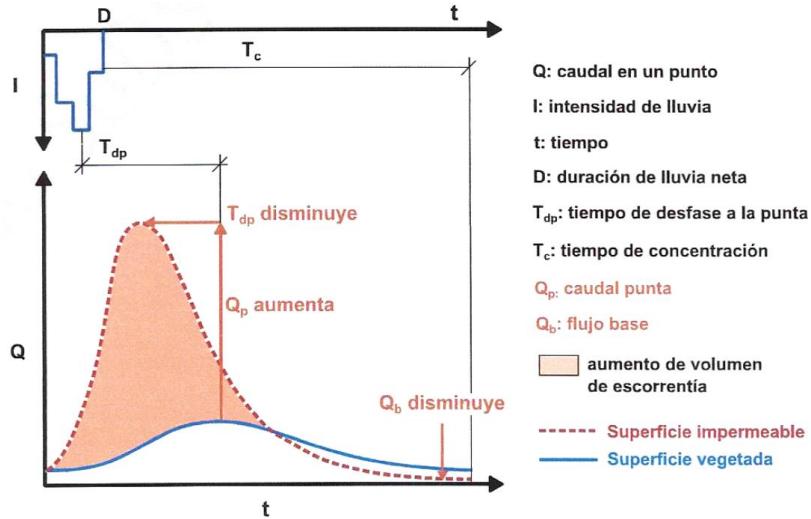
Para Universidad de Alicante (2020):

Como se puede observar, al impermeabilizar la cuenca, se genera un caudal pico o punta (Q_p) mucho mayor y se reduce el tiempo de desfase de la punta (T_{dp}), esto es, el tiempo de llegada al punto de control.

La pendiente más pronunciada de la rama ascendente del hidrograma denota que la velocidad de llegada es mucho mayor. A partir de Q_p el caudal desciende bruscamente, llegando a situarse por debajo del caudal base (Q_b) que se tendría en condiciones naturales.

En la cuenca natural (sin alteración), una gran parte del agua precipitada se infiltra al subsuelo mientras el resto fluye por la superficie en forma de escorrentía. En cambio, en una cuenca impermeabilizada, la mayor parte del agua de lluvia fluye por la superficie, en forma de escorrentía. (p. 14)

Figura 6. **Cambios inducidos por el desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía**



Fuente: Universidad de Alicante (2020). *Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes*.

1.6.3.1. Funcionamiento de los SUDS

Para Cicle Integral de l'Aigua (2021):

Los SUDS son un conjunto de técnicas que reproducen los procesos hidrológicos naturales, y que complementan al drenaje tradicional para la gestión de las escorrentías.

Existen varias formas de clasificar los SUDS, pudiendo hacerse según su función principal, el tipo de actuación, el tipo de sistema empleado o su lugar de aplicación. (p. 20)

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible realizan las siguientes funciones hidrológicas:

- Filtración: retención de sedimentos contenidas en las aguas pluviales mediante procesos físicos, al hacer pasar la escorrentía a través de medios porosos, suelo artificialmente creado o vegetación.
- Detención: “almacenamiento temporal de la escorrentía y descarga laminada de esta a la red o punto de vertido, reduciendo de este modo los caudales pico y favoreciendo la sedimentación” (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 20).
- Tratamiento: “se favorecen procesos físicos y biológicos, como la fitorremediación o las colonias bacterianas para metabolizar contaminantes presentes en la escorrentía y mejorar su calidad” (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 20).
- Retención: almacenamiento a medio plazo de la escorrentía para usos no potables o recreativos.
- Infiltración: se favorece el flujo vertical y la recarga de acuíferos, permitiendo que la escorrentía fluya a través del subsuelo.

Hay que considerar que los SUDS no cumplen una única función, sino que, por sus particularidades, puedan realizar dos o más. Incluso, variaciones en la configuración del sistema pueden hacer que una técnica SUDS se comporte de un modo u otro. (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 21)

1.6.3.2. Principales tipos de SUDS

Se puede dividir a los SUDS en dos grupos en función a la tipología de actuación a realizar:

- Medidas estructurales: son aquellas que necesitan de algún elemento constructivo para gestionar el agua de lluvia, prevenir su contaminación y/o reducir la generación de escorrentía. Entre ellas se encuentran: los pavimentos permeables, los alcorques estructurales o las cubiertas vegetadas (Cicle Integral de l'Aigua, 2021).
- Medidas no estructurales: “son aquellas medidas que, no necesitan de una intervención física concreta sobre el sistema de drenaje, con ello se logra una mejora en la gestión de las aguas de lluvia y una optimización de las infraestructuras existentes” (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 22). Estas medidas incluyen actuaciones educativas, legislativas, de planificación y de gestión. Sus objetivos principales son optimizar el aprovechamiento de los sistemas de drenaje existentes, sensibilizar a la ciudadanía acerca de la importancia del drenaje urbano y favorecer el diseño adecuado de las futuras infraestructuras.

1.6.3.3. Tipos de SUDS estructurales

- Cubiertas vegetadas: “están formadas por un conjunto de capas que permiten la creación de un paquete vegetado sobre el tejado” (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 24).
- “Esta vegetación es el punto de contacto de la lluvia con el edificio, y posibilita su filtrado y retención en la capa de sustrato. Además, la

escorrentía es almacenada temporalmente en la capa de drenaje, desde donde servirá de riego pasivo” (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 24).

- Parterres inundables: “son áreas deprimidas y ajardinadas que permiten almacenar la escorrentía procedente de superficies impermeables adyacentes. Los parterres inundables se pueden clasificar según la procedencia de las lluvias que gestionan” (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 24).
 - Jardines de lluvia: gestionan escorrentías poco contaminadas, procedentes de zonas peatonales o cubiertas.
 - Áreas de biorretención: reciben escorrentías contaminadas, procedentes de zonas con tráfico rodado, que requieren un alto nivel de tratamiento.
- Balsas de detención o infiltración: “son depresiones que, durante un evento de lluvia, que por el sistema implementado tiene la capacidad para almacenar de manera temporal el agua para descargarlo al alcantarillado de manera controlada y/o por medio de la infiltración” (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 25). Además, la detención de las escorrentías facilita la deposición de los sedimentos arrastrados.
- “Cunetas vegetadas: son canales anchos, de poca profundidad, y cubiertos de vegetación que reciben escorrentías procedentes de zonas impermeables adyacentes” (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 25). Además de permitir el transporte de estas escorrentías, la vegetación favorece la eliminación de contaminantes a través de la sedimentación y la filtración. También pueden permitir la infiltración al terreno si ello resulta

aconsejable. Suelen emplearse en viales, caminos y otras superficies alargadas, ya que la escorrentía entra lateralmente en las mismas. (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 25)

- Alcorques estructurales: “los alcorques estructurales están formados por un suelo estructurado que sirve de almacenamiento temporal de las escorrentías, y como espacio para el crecimiento de las raíces del árbol. Este suelo presenta capacidad portante lo que permite el tráfico sobre el mismo” (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 26)
- Pavimentos permeables: “son sistemas de pavimentación que permiten la filtración de la escorrentía a través de ellos, hacia capas subsuperficiales. De este modo, el agua puede almacenarse temporalmente en la subbase (mediante gravas o geoceldas), pudiendo infiltrarse al terreno o descargarse” (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 26).

Existen dos tipologías principales, atendiendo al tipo de superficie permeable:

- Pavimentos porosos: formados por una superficie cubierta por un material poroso (hormigón, asfalto, gravas reforzadas, entre otros).
- Pavimentos permeables por junta: “compuestos por unidades de materiales impermeables, cuya geometría y/o colocación facilita el paso del agua a través de las juntas” (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 26).
- Drenes filtrantes: “consisten en zanjas de poca profundidad llenas de un material filtrante con un dren perforado en la capa inferior. La escorrentía

suele llegar a la zanja por los laterales, y en ella se filtra y almacena temporalmente" (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 27).

- Zanjas y pozos de infiltración: "son excavaciones en el terreno que se rellenan de materiales con un alto porcentaje de huecos, ya sean granulares o sintéticos. Este volumen subsuperficial sirve de almacenamiento temporal previo a la infiltración de las escorrentías" (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 27).

Este sistema se puede clasificarse en:

- Zanjas: son excavaciones lineales y poco profundas, que pueden ser recubiertas de vegetación o gravas.
- Pozos: son perforaciones verticales de mayor profundidad.
- "Depósitos reticulares: son estructuras subterráneas modulares, con un alto índice de huecos y una buena capacidad portante" (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 28).

Permiten el almacenamiento del agua que se genera en áreas impermeables para encausarlo a estos sistemas, luego sigue el proceso de reutilización o infiltración. No proporcionan tratamiento a las escorrentías por sí mismos, por lo que suelen ir acompañados de elementos auxiliares de tratamiento y regulación. (Cicle Integral de l'Aigua, 2021, p. 28).

La entrada de la escorrentía se produce por filtración desde la superficie o mediante una tubería tras haber realizado un tratamiento previo. Es recomendable incluir un segundo tubo que actúe como elemento de rebose.

- **Humedales artificiales y estanques:** “son lagunas artificiales que, a través de fitorremediación mediante plantas hidrófilas, permiten la mejora de la calidad de las aguas” (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 28).

Presentan una lámina de agua permanente, que varía al recibir aportaciones de zonas impermeables, proporcionando un volumen de laminación. También cuentan con estructuras de rebose que permiten la evacuación controlada de las aguas si se excede su nivel de servicio. (Cicle Integral de l’Aigua, 2021, p. 28)

1.7. Modelación hidráulica

Según Jimenez y Joya (2015):

El modelo hidráulico corresponde a un sistema que simula un objeto real, mediante datos de entrada de cierta información que se procesa y presenta en forma adecuada para emplearse en el diseño y operación de obras de ingeniería.

El empleo de un modelo hidráulico implica establecer un programa de investigación experimental sobre todas las variables que intervienen. se hace para poder validar soluciones analíticas de un problema dado, o determinar las leyes de relación entre las diferentes variables. (p. 28)

1.7.1. Aspects de la modelación

Para la modelación hidráulica se deben considerar principalmente los objetivos del estudio, el tipo de modelo a emplear, el nivel de detalle necesario para un determinado resultado.

1.7.1.1. Modelos

Para Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018):

Un modelo es una abstracción de la realidad, en la que se establecen relaciones para tratar de entender el comportamiento de un fenómeno”.

La representación de un sistema real a través de un modelo parte de ciertas inferencias y emplea información a diferentes escalas para entender el comportamiento del fenómeno de interés.

El nivel de resolución de los datos y la información requerida, así como el grado de complejidad del modelo a emplear, depende básicamente de los objetivos del estudio (p. 8).

Figura 7. Componentes de un modelo



Fuente: IDEAM (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*.

1.7.1.2. Tipos de modelos

Para Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018) la clasificación general de modelos puede ser:

Descriptivos, Gráficos, experimental (modelos de juicio), analógicos, a escala o modelos físicos, matemáticos.

Otra clasificación en base a la temporalidad de los modelos es:

- Modelos de eventos: la duración puede variar de horas a pocos días y hacen referencia básicamente a modelación hidrológicos de aguaceros.
- Modelos continuos: concebidos para modelar periodos largos (meses, años). Son bastante útiles en un contexto de gestión del recurso hídrico. (p. 9)

Figura 8. Escala temporal característica de la modelación de la dinámica del agua para determinados fines



Fuente: IDEAM (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*.

Para Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018):

Clasificación general de los métodos para análisis de las series hidroclimatológicas:

- Métodos probabilistas: se caracterizan por describir el comportamiento de una variable a través de una función de densidad de probabilidad empírica o teórica, paramétrica o no paramétrica.
- Algoritmos genéticos: como su nombre lo indica, son programas, algoritmos concebidos bajo el esquema de funcionamiento de las redes neuronales, su principio es el aprendizaje.

- Filtros: concebidos en el área de la econometría y de la ingeniería electrónica, recurren a lo que ocurrió en el pasado para estimar valores presentes y futuros, empleados típicamente en asimilación de la incertidumbre.
- Autorregresivos y de Media Móvil: también llamados Modelos Box-Jenkins, que permiten caracterizar la autocorrelación.
- Funciones de transferencia: trabajan en el dominio de Laplace y relacionan la salida con la entrada.
- Lógica difusa: es la que se recurre a expresiones que no están en la categoría de verdad absoluta o falsedad total. (p. 10)

1.8. **Modelo de gestión de aguas pluviales**

El modelo de gestión de aguas pluviales (*stormwater management model*) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en período extendido (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2021).

El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos. El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía (EPA, 2021).

1.8.1. EPA SWMM

El modelo de gestión de aguas pluviales de la EPA (SWMM) se utiliza en todas partes para la planificación, el análisis y el diseño relacionados con la escorrentía de aguas pluviales, alcantarillado sanitario y combinado y otros sistemas de drenaje (EPA, 2021).

Se puede utilizar para evaluar estrategias de control de aguas pluviales de infraestructura gris, como tuberías y desagües pluviales, y es una herramienta útil para crear soluciones de control de aguas pluviales híbridas verde / gris rentables (EPA, 2021).

SWMM se desarrolló para ayudar a respaldar los objetivos de gestión de aguas pluviales locales, estatales y nacionales para reducir la escorrentía a través de la infiltración y la retención, y ayudar a reducir las descargas que causan el deterioro de los cuerpos de agua (EPA, 2021).

1.8.1.1. Aplicaciones

EPA (2021) indica las siguientes aplicaciones típicas de SWMM:

- Diseño y dimensionamiento de componentes de sistemas de drenaje para control de inundaciones.
- Dimensionamiento de las instalaciones de detención y sus accesorios para el control de inundaciones y la protección de la calidad del agua.
- Mapeo de las llanuras aluviales de los sistemas de canales naturales.

- Diseñar estrategias de control para minimizar los desbordes combinados de alcantarillado.
- Evaluar el impacto de la afluencia e infiltración en los desbordes de alcantarillado sanitario.
- Generación de cargas contaminantes de fuentes difusas para la asignación de cargas de residuos.
- Controlar la escorrentía del sitio utilizando prácticas de infraestructura verde como controles de LID bajos.
- Evaluar la efectividad de las mejores prácticas de manejo y desarrollo de bajo impacto para reducir las cargas contaminantes del clima húmedo (párr. 10-17).

1.8.1.2. Herramientas LID'S

SWMM permite representar combinaciones de prácticas de infraestructura verde como controles de desarrollo de bajo impacto (*low impact development, LID*) para determinar su efectividad en la gestión de la escorrentía (EPA, 2021).

Tabla I. Prácticas de modelado de SWMM genéricas de infraestructura verde

SWMM puede modelar explícitamente ocho prácticas genéricas de infraestructura verde diferentes:	
Jardines de lluvia	Son áreas deprimidas, plantadas con pastos, flores y otras plantas, que recogen el agua de lluvia de un techo, camino de entrada o calle y permiten que se infiltre en el suelo. Los más complejos a menudo se denominan células de bioretención (EPA, 2021).
Células de bioretención (o bioswales)	Son concavidades contenidas de vegetación que cumplen tres funciones principales el cual es el almacenamiento, infiltración y evaporación tanto de la lluvia que cae directamente sobre el sistema, así como de la escorrentía capturada alrededor del sistema (EPA, 2021).
Vegetativo	Swales vegetativas son canales o zonas deprimidas con pendiente lados cubiertos de hierba y otra vegetación que ralentizan el transporte de la escorrentía se recoge y se permiten más tiempo para infiltrarse en el suelo nativo debajo de ella" (EPA, 2021).
Zanjas de infiltración	Son estructuras de excavación estrechas las cuales se llenan de material granular (generalmente grava) que interceptan la escorrentía a través de sistemas de evacuación de las áreas impermeables hacia estos sistemas (EPA, 2021). Las zanjas de infiltración proveen volumen de almacenamiento y tiempo para que el agua captada se infiltre en el suelo" (EPA, 2021).
Techos verdes	Los techos verdes tienen una capa de suelo sobre un material de alfombra de drenaje especial que transporta el exceso de lluvia percolada fuera del techo. Contienen vegetación que permite la infiltración de la lluvia y la evapotranspiración del agua almacenada (EPA, 2021).

Continuación tabla I.

Desconexión de la azotea (bajante)	Esta práctica permite que el agua de lluvia de la azotea se descargue en áreas ajardinadas y céspedes permeables en lugar de directamente en los desagües pluviales (EPA, 2021).
	Se puede utilizar para almacenar aguas pluviales (por ejemplo, en un barril de lluvia) y / o permitir que las aguas pluviales se filtre en el suelo (por ejemplo, en un jardín de lluvia o césped).
Bariles o cisternas de lluvia (recolección de agua de lluvia)	Los barriles y cisternas de lluvia son depósitos donde se evacua la escorrentía del techo durante eventos de lluvia, el cual es agua que puede ser reutilizada en época seca. Las cisternas pueden estar ubicadas por encima o por debajo del suelo y tienen una mayor capacidad de almacenamiento que un barril de lluvia (EPA, 2021).
Sistemas continuos de pavimento permeable	El pavimento permeable permite que la escorrentía se infiltre en el pavimento para entrar con el suelo nativo para continuar con la infiltración natural. En los sistemas de adoquines de bloques, la lluvia se captura en los espacios abiertos entre los bloques y se transporta a la zona de almacenamiento y al suelo nativo que se encuentra debajo (EPA, 2021).

Fuente: EPA (2021). *Storm water management model SWMM*.

1.9. Marco jurídico y legislación en materia de aguas pluviales

En muchas ciudades del mundo se han adoptado leyes, decretos, reglamentos u otros para el tema de aguas pluviales. Mientras en Guatemala, en materia de legislación respecto al manejo de aguas pluviales es poco lo que se ha destacado, que es a través de normas y/o reglamentos a nivel municipal.

1.9.1. Competencia municipal establecida en el Código Municipal

De acuerdo como lo establece el Decreto 12-2002 (2002), art. 68, inciso a competencias propias del municipio “abastecimiento domiciliario de agua potable debidamente clorada; alcantarillado; alumbrado público; mercados; rastros; administración de cementerios y la autorización y control de los cementerios privados; limpieza y ornato” (p. 25).

De acuerdo con lo descrito en el Decreto 12-2002 (2002), Art. 72 establece “el municipio debe regular y prestar los servicios públicos municipales de su circunscripción territorial y, por lo tanto, tiene competencia para establecerlos, mantenerlos, ampliarlos y mejorarlos” (p. 26).

1.9.2. Funciones de los Consejos Comunitarios de Desarrollo

Dentro de las funciones de los Consejos Comunitarios de Desarrollo establecida en el Decreto 11-2002 (2002), Art. 14, inciso b se indica “promover, facilitar y apoyar la organización y participación efectiva de la comunidad y sus organizaciones, en la priorización de necesidades, problemas y sus soluciones, para el desarrollo integral de la comunidad” (p. 7).

Mientras en el Decreto 11-2002 (2002), Art. 14 inciso e establece “formular las políticas, planes, programas y proyectos de desarrollo de la comunidad, con base en la priorización de sus necesidades, problemas y soluciones, y proponerlos al Consejo Municipal de Desarrollo para su incorporación en las políticas, planes, programas y proyectos” (p. 7).

2. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cualitativo, ya que se realizará una descripción de las cualidades de cada sistema y/o elemento del área analizado.

El alcance de la investigación es de tipo explicativo, porque se examinará un tema poco estudiado y el cual permite aumentar la comprensión sobre un tema específico, y en donde se puede encontrar las razones por las que sucede un fenómeno.

Se describirán a continuación tres fases del estudio.

2.2. Evaluación del sistema de drenaje actual del área urbana

En esta fase del estudio se tiene una aproximación al comportamiento del sistema de drenaje actual encargado del transporte de las aguas pluviales del área urbana del municipio.

2.2.1. Modelo hidrológico

En el modelo hidrológico se asignan los parámetros hidrológicos y la delimitación de la subcuenca.

- Identificación de elementos de drenaje

En la primera fase del estudio se hizo un levantamiento de campo de información relevante de obras de infraestructura para el estudio, se identificó 3 puntos de descarga, además se constató que el caso urbano no existe alcantarillado de agua pluvial, por lo que las calles son las encargadas del transporte de esta escorrentía. Y en el caso de drenaje natural se ubicó el río Piedra Blanca y el río Xecol que pasan en el lado este y oeste del área urbana respectivamente.

- Modelar el funcionamiento de la red actual de drenaje pluvial

En esta etapa se realizó un modelado a través del software Epa SWMM, en donde se identificó puntos críticos de inundaciones. En el proceso de la modelación digital en el programa EPA SWMM del alcantarillado actual de la zona de estudio, se realizó con la finalidad de verificar las condiciones hidráulicas en las que se encuentra el sector y de esta manera proponer las posibles soluciones, considerando una propuesta que incluya tecnologías de los SUDS.

La información que se tuvo en cuenta para el análisis fue lo siguiente:

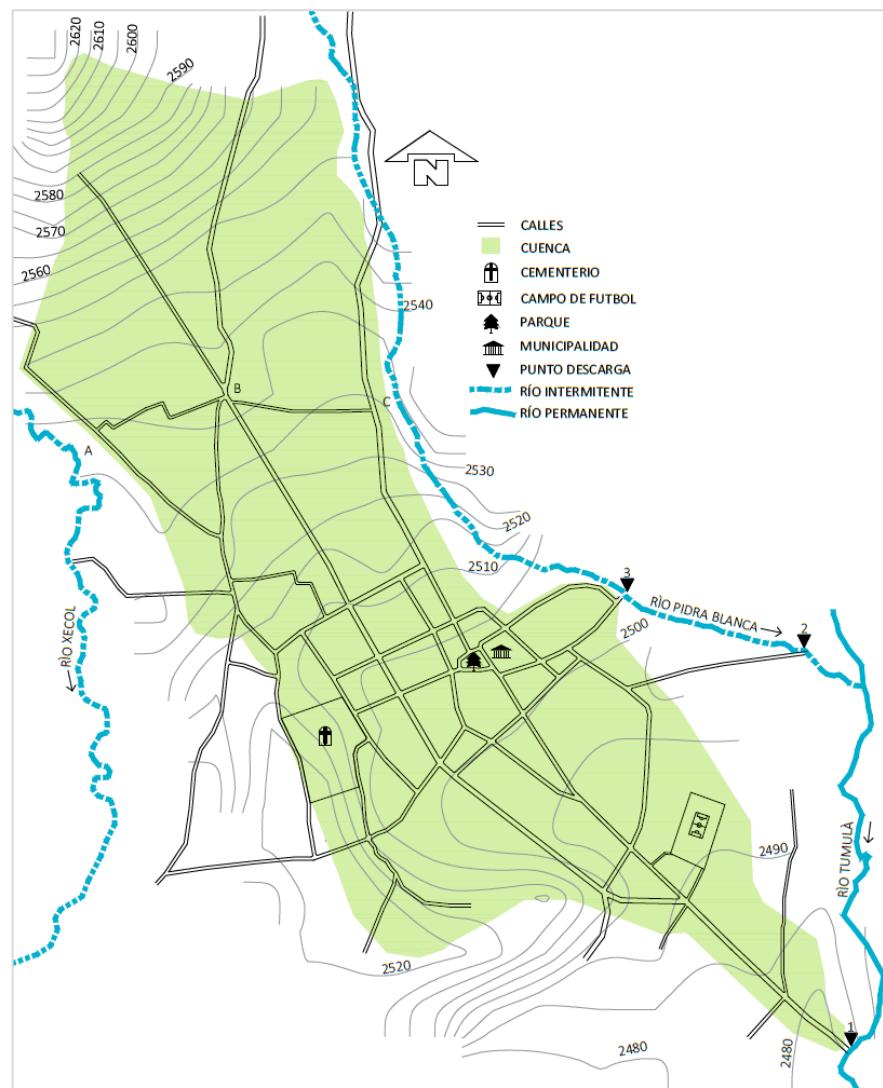
2.2.1.1. Delimitación de cuenca

Se partió de un modelo de elevación digital de la zona, Se utilizó el software Qgis y se generó una microcuenca con intervención en el área urbana del municipio, se hizo inspección de campo de las áreas de drenaje: quebradas, ríos, límites.

Luego se realizó una revisión y modificación manual de las áreas tributarias: tomando en cuenta las curvas de nivel del área de estudio, vista

satelital, vías, y modificando las áreas para tener una geometría más aproximada al área real. Para lo cual se obtuvo un área total de 78.8 ha.

Figura 9. **Área total de la microcuenca que drena hacia el área urbana**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

2.2.1.2. Zona de expansión

Actualmente el municipio no cuenta con un plan de ordenamiento territorial, por lo que el plan de desarrollo municipal ordenamiento territorial (PDM-OT) del municipio establece zona de expansión urbana en la parte sur del municipio, no teniendo impactos en el área urbana de la escorrentía que pudieran generarse del área de expansión.

2.2.1.3. Método lluvia escorrentía

Para este estudio se utilizó el método del Soil Conservation Service (SCS).

2.2.1.4. Parámetros subcuenca utilizados en la modelación SWMM

Se utilizaron los siguientes parámetros para la modelación de la subcuenca:

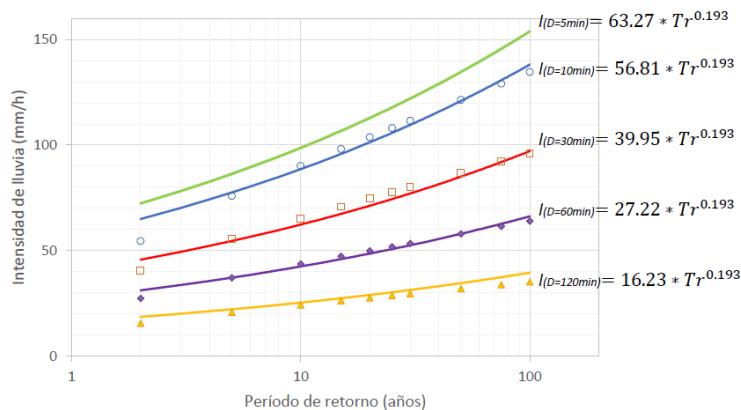
- Ancho del área tributaria: para medir este parámetro se utilizó herramientas de QGIS por cada área tributaria.
- Almacenamiento en la zona impermeable: se considera un valor de 3 mm.
- Almacenamiento en la zona permeable: se considera un valor de 5 mm.
- Manning zona permeable: se toma un valor de 0.15 para pastos cortos.
- Manning zona impermeable: se toma un valor de 0.013 que corresponde a superficies de concreto.

- Porcentaje de área impermeable: este parámetro se revisó manualmente para cada cuenca, usando fotografías aéreas y planos SIG.
- Pendiente: Información que se obtuvo de GQUIS.
- No se modela agua subterránea.

2.2.1.5. Eventos de lluvia

Para la modelación del sistema se utilizaron los registros de lluvia de la estación más cercana a la subcuenca de estudio siendo la estación Labor Ovalle ubicada a 12.4 km del área de estudio.

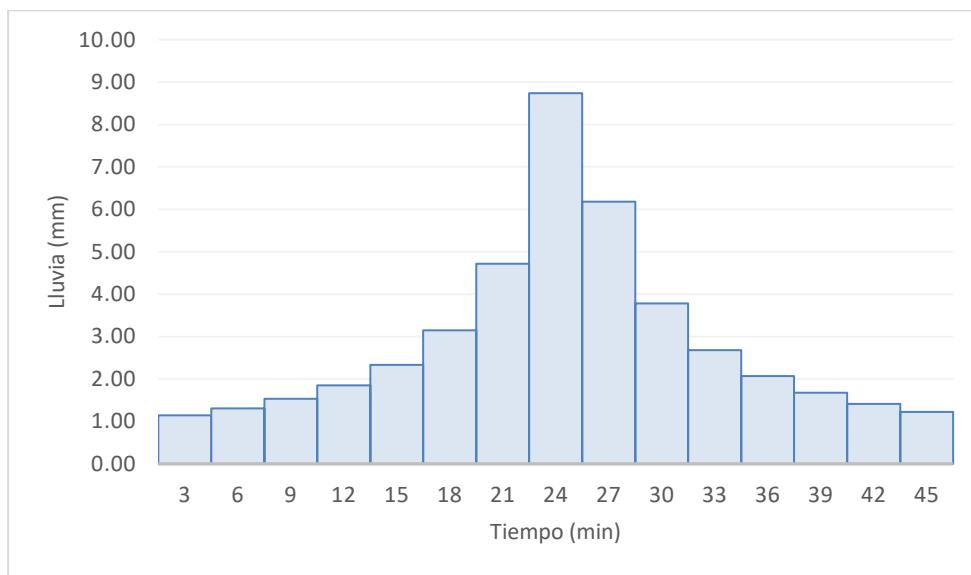
Figura 10. **Curvas IDF típicas de la estación climática Labor Ovalle**



Fuente: INSIVUMEH (2018). *Curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la república de Guatemala.*

A partir de la intensidad de las curvas IDF, se construye con el método del bloque alterno el hietograma de diseño para una duración de 45 minutos y delta de tiempo de 3 minutos, considerando un periodo de retorno (Tr) 10 años.

Figura 11. **Hietograma lluvia TR 10 años**

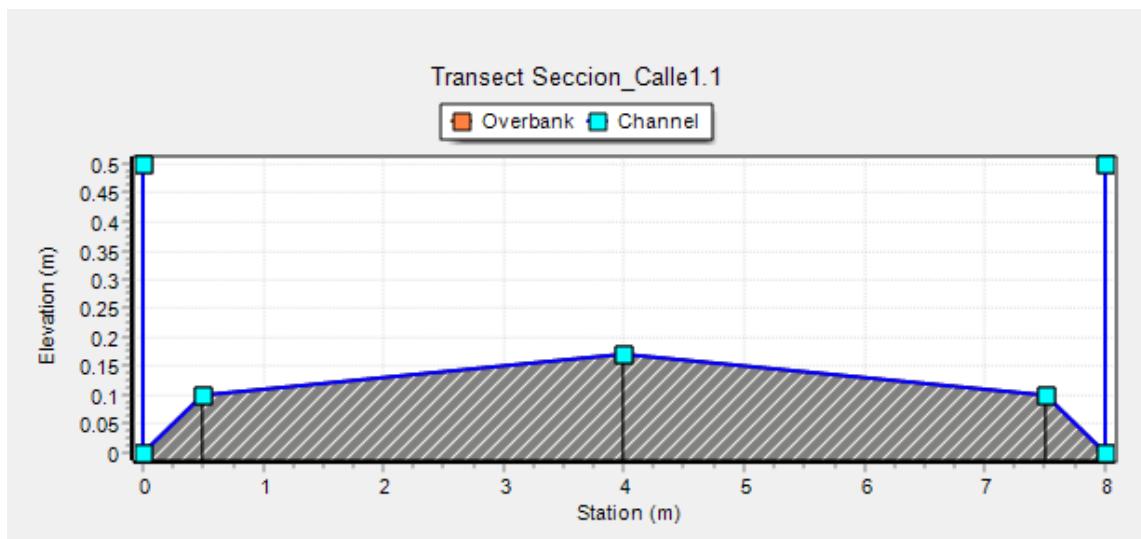


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.2.1.6. **Modelo hidráulico**

Se compone de los elementos físicos que forman el sistema actual encargados del transporte del agua pluvial que se genera en la zona. Por la inexistencia de red de alcantarillado pluvial se toman las calles como canal abierto encargados del transporte de estas aguas. Con secciones que varían en cada tramo de las principales calles del área urbana. En la figura 12 se presenta la sección típica de calle del último tramo de la descarga 3, en esta sección de dejó una altura de 0.50 m para realizar la modelación en SWMM, considerando que la altura real es de 0.20 m.

Figura 12. Sección típica de calle



Fuente: elaboración propia, empleando swmm.

Parámetros usados para cada tramo de calle son los siguientes:

- Material y n de Manning: todos los tramos planteados son calles de concreto. La rugosidad se toma de $n=0.013$.
- Sección: todas las secciones de calle varían, por lo que la capacidad hidráulica varía en cada tramo.
- *Cota invert* inicio del tramo, *cota invert* llegada tramo, y pendiente: se asignaron datos coherentes, considerando la diferencia entre estos valores para cada unión, también se revisó la pendiente de cada tramo, evitando con ello pendientes negativas y que las pendientes sean mayores a 0.5 %.

- Factor de pérdidas de entrada y salida de los tramos: no se consideraron pérdidas en este modelo de la situación actual.
- Calidad del agua: la calidad del agua en este estudio no se consideró.

2.3. Propuesta de manejo de agua de lluvia en el área urbana

Se analizan dos propuestas en esta fase, en la primera se propone una red de alcantarillado (red colectora) y se analizan los resultados hidráulicos e hidrológicos del mismo. Y una segunda propuesta incluye sistemas urbanos de drenaje sostenible que se pueden implementar en el área de estudio que suman a la primera propuesta.

2.3.1. Propuesta 1

En la propuesta No. 1 se hizo un análisis de un sistema únicamente conformado por colectores para el transporte de las aguas pluviales hacia los puntos de descarga.

2.3.1.1. Modelo hidrológico

En esta fase del estudio se consideran los mismos parámetros considerados en la sección 2.2.1.3 a la sección 2.2.1.5 para evaluar el sistema con las mismas condiciones hidrológicas.

2.3.1.2. Delimitación de microcuenca

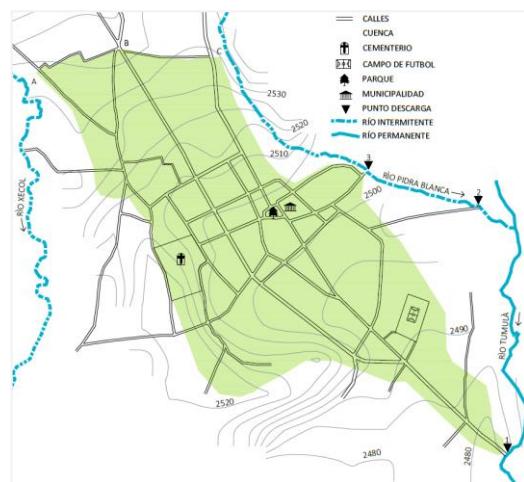
Se realizó la revisión y modificación manual de las áreas tributarias dado que en el punto C de la figura 22 hay infraestructura de drenaje pluvial (drenaje

transversal) que desfoga al río y que actualmente no está en funcionamiento y que puede ser rehabilitado, mientras en el punto B de la cuenca se considera la construcción de un drenaje transversal que pueda recolectar la escorrentía generada en el lado norte de la cuenca. Con las consideraciones planteadas la cuenca de análisis en esta fase queda como lo presentado en la figura 13 y en la figura 14 se presentan las microcuenca que drenan hacia los colectores planteados. El área total de la cuenca en análisis modificada es de 46.9 ha.

2.3.1.3. Modelo hidráulico

Son todos los elementos físicos encargados del transporte de la escorrentía. Se partió de la información del modelo de elevación digital del área. Se realizó una revisión detallada de todos los elementos presentes en el área de estudio. Con esto se logra tener un modelo coherente al comportamiento real y que los resultados obtenidos sean confiables.

Figura 13. Microcuenca con condición modificada que drena por el área urbana



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

Figura 14. **Microcuenca delimitada por zonas de descarga**

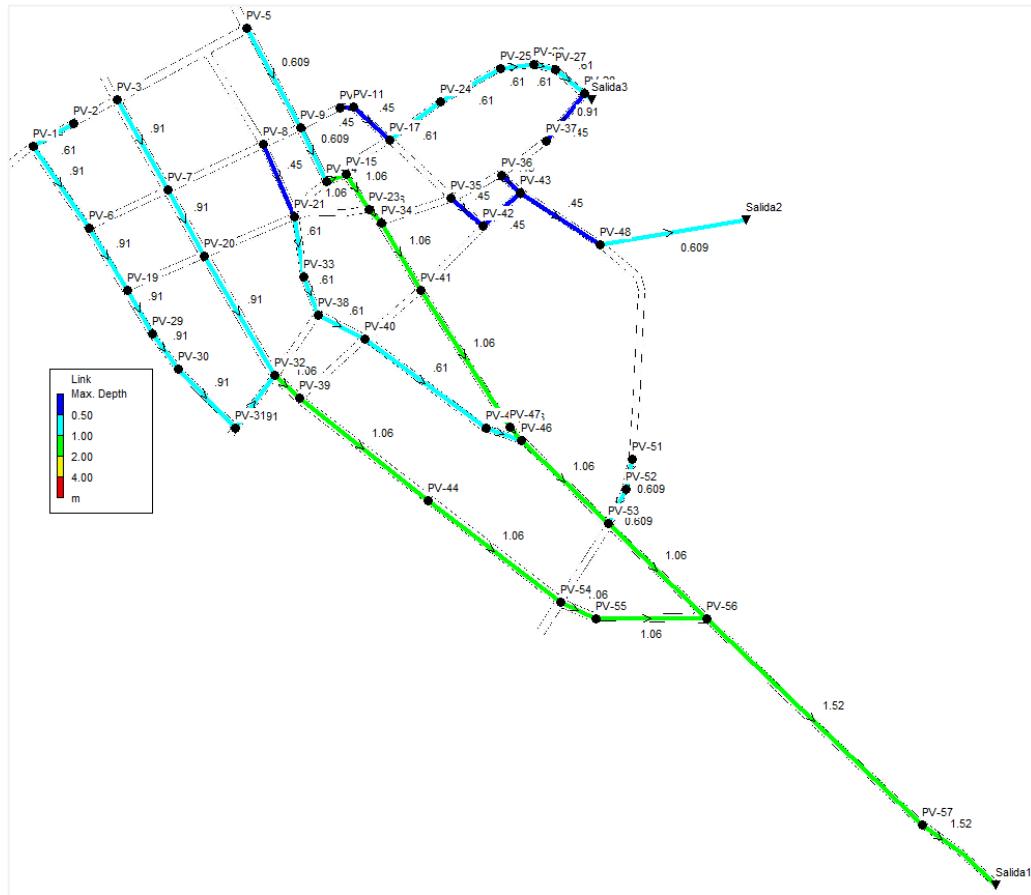


Fuente: elaboración propia, empleando Qgis.

2.3.1.4. **Propuesta de red de alcantarillado pluvial**

Después de la delimitación de la cuenca de intervención, se propone las líneas de alcantarillado pluvial (colectores principales y secundarios). El modelo consta de líneas principales de alcantarillados con diferentes diámetros (diámetro mayor o igual a 45 mm). En la figura 15 se presentan los colectores propuestos para su análisis.

Figura 15. Colectores propuestos en el área urbana



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

Parámetros usados:

- Conectividad: todos los tramos tienen conectividad, para ello se utilizaron los pozos de visita y las descargas (salidas).
- Longitud: varía entre 2 y 100 m.

- Material y n de Manning: todos los tramos planteados son de PVC. La rugosidad se toma de 0.009 que corresponde al coeficiente de rugosidad de tuberías de PVC.
- Diámetro: varían entre 450 mm (18 pulgadas) y 1500 mm (60 pulgadas).
- Cota *invert* inicio del tramo, cota *invert* llegada tramo, cota fonda de pozo y pendiente: la cota *invert* de inicio es mayor a la cota *invert* de llegada, respetando y revisando que la pendiente mínima de la tubería sea 0.50 %.
- Cuando a la cámara llegan varias tuberías se revisa en el modelo para que la cota *invert* de salida sea menor a las entradas. para tener un sistema funcional.
- También se revisó que la cota *invert* de inicio del tramo sea mayor que la cota *invert* de llegada, con el fin de que la pendiente sea positiva. Se revisa que las pendientes sean mayores a 0.5 %.
- Factor de pérdidas de entrada y salida de los tramos: para todos los tramos se toma un valor de pérdida de salida del tramo de 0.2 y de entrada de 0.5.
- Calidad del agua: la calidad del agua en este estudio no se consideró.

2.3.2. Propuesta 2

En esta propuesta, posterior al análisis de la situación actual se propondrá implementar sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) acordes al área para la mitigación de inundaciones y controlar la escorrentía en el punto donde

se genera. Se consideran los mismos parámetros hidráulicos e hidrológicos en la primera propuesta para comparación de resultados bajo las mismas condiciones.

2.3.2.1. Sistemas de drenaje sostenible a implementar

Para realizar la selección se toman los SUDS implementados en EPA SWMM y se revisa las condiciones de espacio disponible y se consideran los requerimientos para su implementación. Se define implementar las zanjas o pozos de infiltración, los pavimentos permeables, techos verdes y almacenamiento de lluvia. No se descartan los techos verdes ya que la zona urbana de estudio no está densamente poblada, por lo que podría incentivarse a las nuevas construcciones para prever estructuralmente los edificios públicos y/o privados.

Las zanjas o pozos de infiltración y los tanques de reciclaje de agua tiene un buen desempeño en las zonas de pendientes del terreno media y alta; con respecto a los pavimentos permeables estos se utilizarán en las calles, las cuales son paralelas a las curvas de nivel y que tienen una pendiente baja.

Dentro del estudio se implementan para la modelación los presentados en la tabla II.

Tabla II. Prácticas de modelado de SWMM genéricas de infraestructura verde

SUDS	Descripción
Zanjas de infiltración	Se consideró su uso en calles y parqueos.
Techos verdes	Esta tecnología de SUDS se contempló para los edificios públicos.
Bariles o cisternas de lluvia (recolección de agua de lluvia)	Se consideró esta tecnología en la periferia del área urbana del municipio.
Pavimento permeable	Esta tecnología se usó en las calles perpendiculares a la pendiente natural de las subcuenca

Fuente: EPA (2021). *Storm water management model SWMM*.

En la tabla III se presentan los parámetros utilizados para el sistema de pavimentos permeables, en la tabla IV parámetros de almacenamiento de lluvia, en la en la tabla V parámetros de zanjas de infiltración, y en la tabla VI parámetros para techo verde.

Tabla III. Pavimento permeable

<i>Permeable pavement</i>		
Surface	<i>Berm height</i> (mm)	10
	<i>Vegetation volume fraction</i>	0
	<i>Surface roughness</i>	0.015
	<i>Surface slope (%)</i>	2
Pavement	<i>Thickness</i> (mm)	150
	<i>Void ratio</i>	0.16
	<i>Impervious surface ratio</i>	0
	<i>Permeability</i> (mm/h)	300
	<i>Clogging factor</i>	0
	<i>Regeneration interval (days)</i>	0
	<i>Regeneration fraction</i>	0

Continuación tabla III.

Soil	<i>Thickness (mm)</i>	150
	<i>Porosity</i>	0.50
	<i>Field capacity</i>	0.20
	<i>Wilting point</i>	0.10
	<i>Conductivity (mm/h)</i>	3.3
	<i>Conductivity slope</i>	10
	<i>Suction head (mm)</i>	88.9
Storage	<i>Thickness (mm)</i>	450
	<i>Void ratio</i>	0.63
	<i>Seepage rate (mm/h)</i>	3.3
	<i>Clogging factor</i>	0
Drain	<i>Flow coefficient</i>	0
	<i>Flow exponent</i>	0.50
	<i>Offset (mm)</i>	6
	<i>Open level (mm)</i>	0
	<i>Closed level (mm)</i>	0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Tabla IV. Almacenamiento de lluvia

Rain barrel		
Storage	<i>Barrel height (mm)</i>	2000
Drain	<i>Flow coefficient</i>	0
	<i>Flow exponent</i>	0.50
	<i>Offset (mm)</i>	0
	<i>Drain delay (hrs)</i>	0
	<i>Open level (mm)</i>	0
	<i>Closed level (mm)</i>	0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Tabla V. Zanja de infiltración

<i>Infiltration trench</i>		
Surface	<i>Berm Height</i> (mm)	0
	<i>Vegetation volume fraction</i>	0
	<i>Surface roughness</i>	0.1
	<i>Surface slope (%)</i>	1
Storage	<i>Thickness</i> (mm)	1000
	<i>Void ratio</i>	0.75
	<i>Seepage rate</i> (mm/h)	210
	<i>Clogging factor</i>	0
Drain	<i>Flow coefficient</i>	0
	<i>Flow exponent</i>	0.50
	<i>Offset</i> (mm)	20
	<i>Open level</i> (mm)	0
	<i>Closed level</i> (mm)	0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Tabla VI. Techo verde

<i>Green roof</i>		
Surface	<i>Berm height</i> (mm)	25
	<i>Vegetation volume fraction</i>	0.2
	<i>Surface roughness</i>	0.1
	<i>Surface slope (%)</i>	20
Soil	<i>Thickness</i> (mm)	152.4
	<i>Porosity</i>	0.50
	<i>Field capacity</i>	0.20
	<i>Wilting point</i>	0.10
	<i>Conductivity</i> (mm/h)	6.604
	<i>Conductivity slope</i>	60
	<i>Suction head</i> (mm)	169.9

Continuación tabla VI.

<i>Drainage mat</i>	<i>Thickness (mm)</i>	0
<i>Void fraction</i>		0.50
<i>Roughness</i>		0.4

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

2.3.2.2. Microcuenca con SUDS implementados

De los sistemas urbanos considerados para su implementación en el área urbana se tomaron áreas de microcuenca donde es posible implementarlos.

Para determinar los SUDS implementados por microcuenca se hicieron las siguientes consideraciones:

- Uso de pavimentos permeables en calles perpendiculares al alcantarillado pluvial propuesto, quedando paralelo a las curvas de nivel del área, esto siguiendo las recomendaciones para este tipo de sistema.
- El almacenamiento de lluvia se planteó en áreas de la periferia urbana que drenan hacia los colectores del agua pluvial.
- Las zanjas de infiltración o pozos de infiltración se plantearon en espacios privados de áreas de parqueo mayores a 200 m² y que actualmente están impermeabilizados.
- Los techos verdes contemplaron los siguientes edificios públicos: la municipalidad, el salón municipal, mercado municipal, la auxiliatura, edificio de bomberos voluntarios, la Cooperativa y edificio del CAP.

2.4. Propuesta de gestión de las aguas pluviales del área urbana del municipio de Cajolá

En esta fase de estudio se plantearon acciones de gestión del servicio de drenaje pluvial, primero se hizo un análisis de la situación actual de la gestión del servicio. Considerando las debilidades actuales se propone un modelo para la gestión de este servicio por parte de la municipalidad del municipio de Cajolá.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Situación actual del sistema de drenaje pluvial en el área urbana del municipio de Cajolá

En esta sección se presentan los resultados de la modelación del sistema pluvial actual del área urbana del municipio, en base a la infraestructura existente sin ninguna propuesta de modificación al sistema actual. En la tabla VII se muestra el desempeño de la cuenca, con los parámetros hidrológicos e hidráulicos considerados para el análisis.

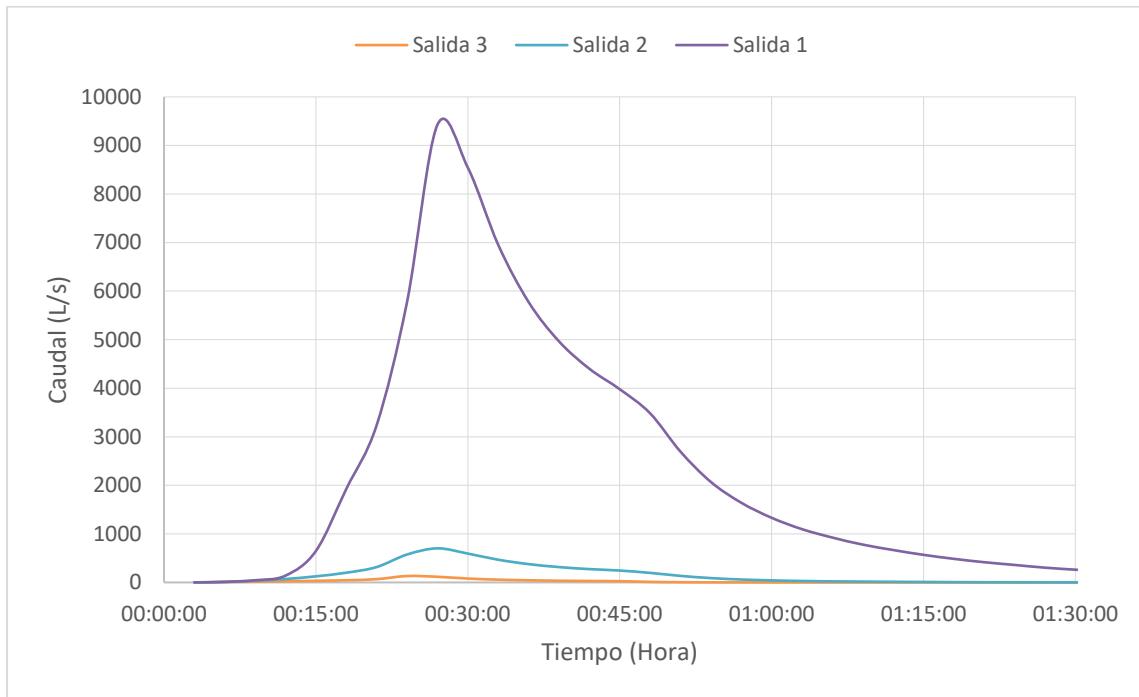
Tabla VII. Desempeño de la cuenca actual

Parámetro	Dato
Volumen de escorrentía (m ³)	19,590
Volumen de lluvia (m ³)	36,633
Caudal de escorrentía máximo (L/s)	9,843
Tiempo donde ocurre máximo caudal (min)	27.00 (iniciado el evento)
Duración de la modelación (horas)	3.0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En la figura 16 se muestran los hidrogramas de las tres salidas de la microcuenca actual.

Figura 16. **Hidrogramas de salidas**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 17, se muestra el caudal simulado que transporta las calles, 27 minutos iniciado el evento, tiempo donde ocurre la máxima escorrentía. La clasificación se muestra por rangos representados por colores, donde azul representa caudal menor a 100 L/s y rojo caudal mayor a 1000 L/s.

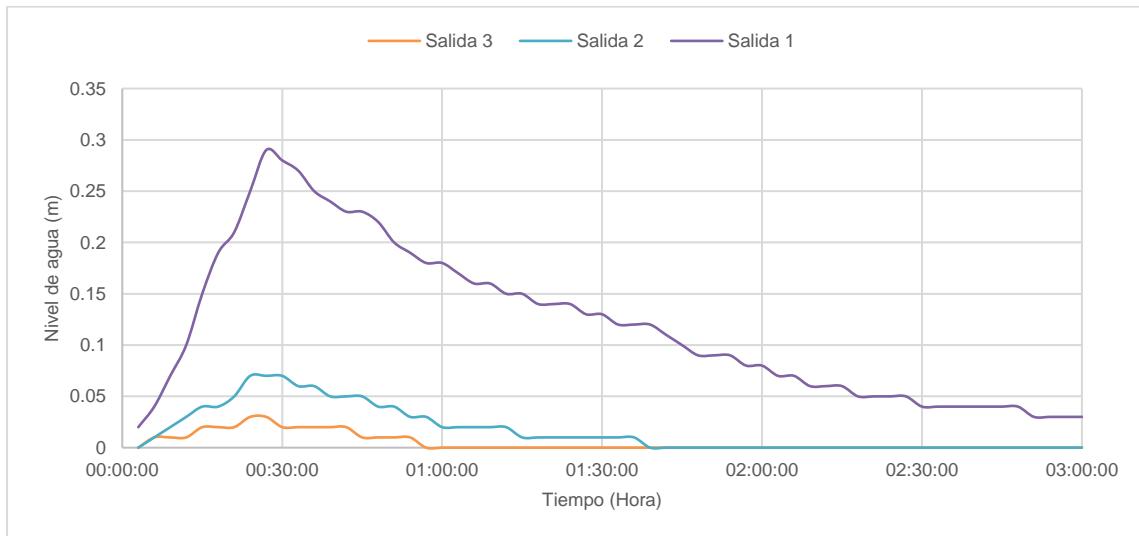
Figura 17. Caudal simulado en calles situación actual



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

En la figuras 18 se muestra el tirante que alcanza el agua en función del tiempo, se presenta el tirante del último tramo de las tres salidas de la microcuenca de estudio.

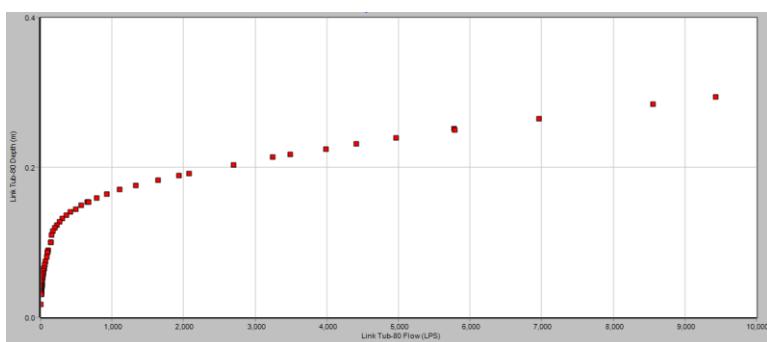
Figura 18. Tirante en las salidas



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 19 se relaciona el nivel de agua en función del caudal en la salida 1, salida de mayor caudal, donde se establece 0.20 m como nivel máximo del tirante donde ocurre rebalse, considerando esta altura igual a la altura de bordillo en la salida 1.

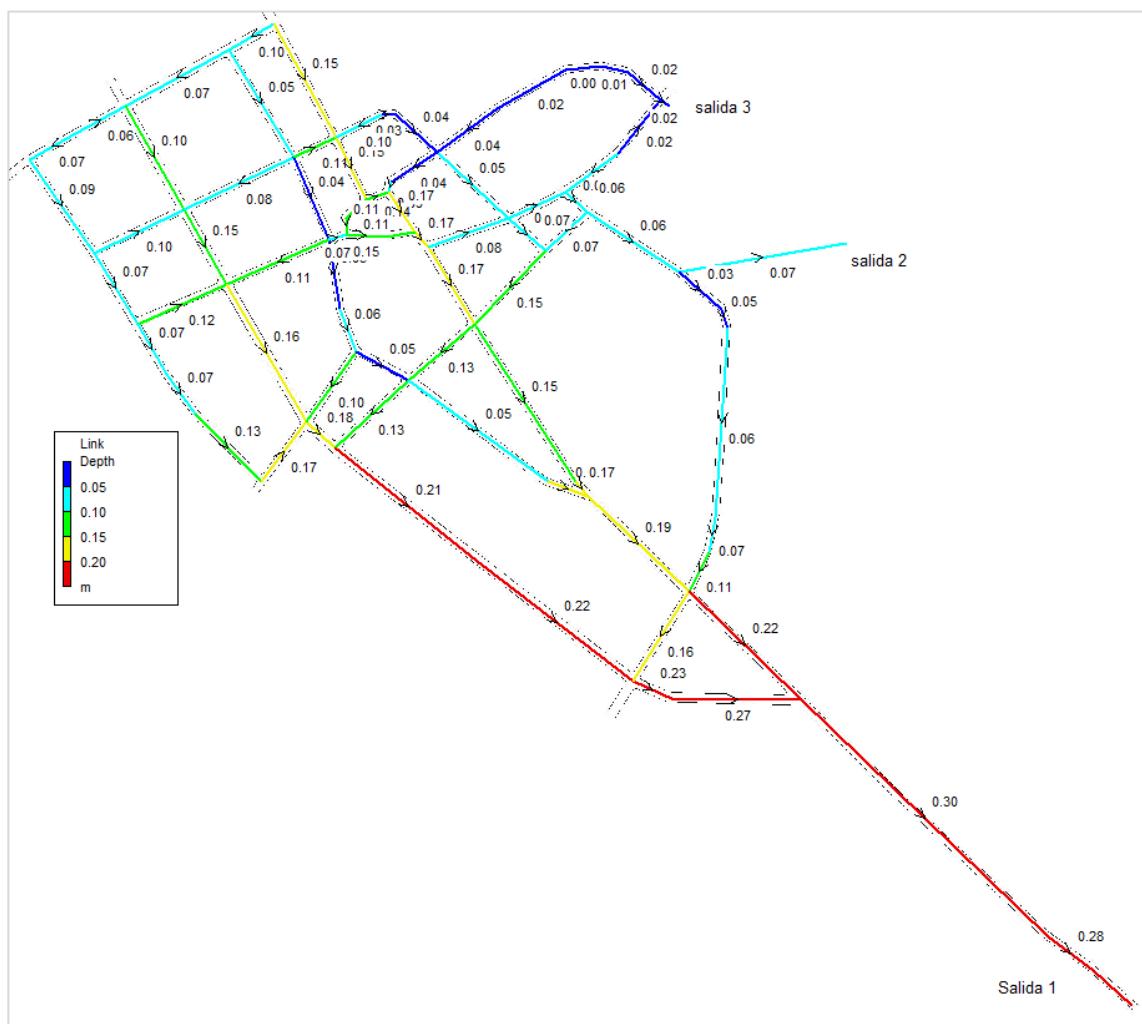
Figura 19. Relación nivel de agua y caudal salida 1



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

En la figura 20 se representa el nivel de agua en las calles del área urbana que corresponde al nivel de agua que se alcanza 27 minutos iniciado el evento. Definiendo la altura de 0.20 m como límite de máximo nivel que puede transportar las calles sin generar rebalse.

Figura 20. Nivel agua simulado en las calles



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

3.2. Propuesta de manejo de agua pluvial en el área urbana

En esta sección se presentan los resultados de la propuesta de manejo de agua pluvial en el área urbana del municipio de Cajolá, en la figura 21 se muestra los SUDS implementados y la ubicación de los sistemas dentro de la microcuenca de análisis. En la tabla VIII se muestra el desempeño de la cuenca, con los parámetros hidrológicos e hidráulicos considerados para el análisis.

Figura 21. Ubicación de SUDS



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

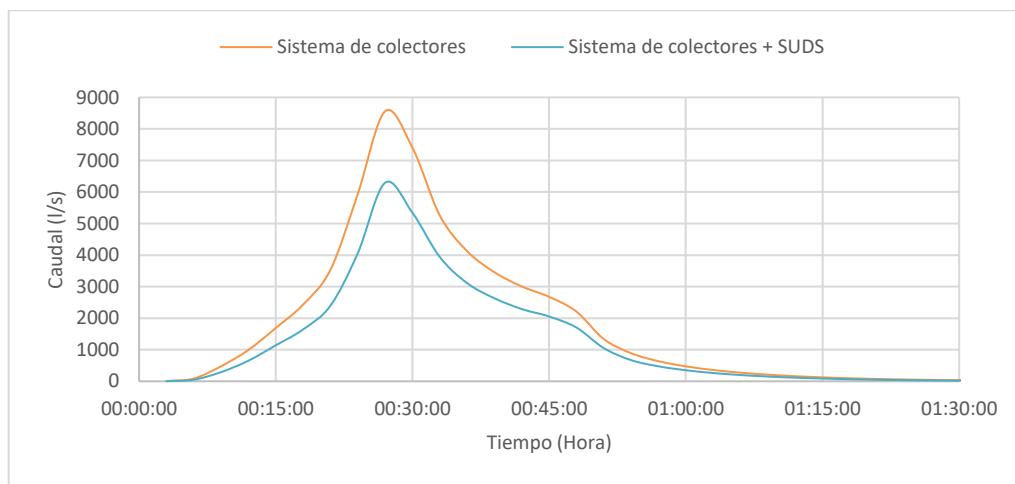
Tabla VIII. **Desempeño de la microcuenca**

Parámetro	Propuesta 1	Propuesta 2
Volumen de escorrentía (m ³)	11,850	8,770
Volumen de lluvia (m ³)	22,007	22,007
Caudal de escorrentía máximo (L/s)	8,560	6,294
Tiempo donde ocurre máximo caudal (min)	27.00 (iniciado el evento)	27.00 (iniciado el evento)
Duración de la modelación (horas)	3.0	3.0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 22 se hace una comparación de los hidrogramas de la salida 1, salida donde ocurre el máximo caudal. En esta figura se compara la propuesta 1 donde se considera la implementación de colectores y la propuesta 2 donde se contempla sistema de colectores incluyendo SUDS.

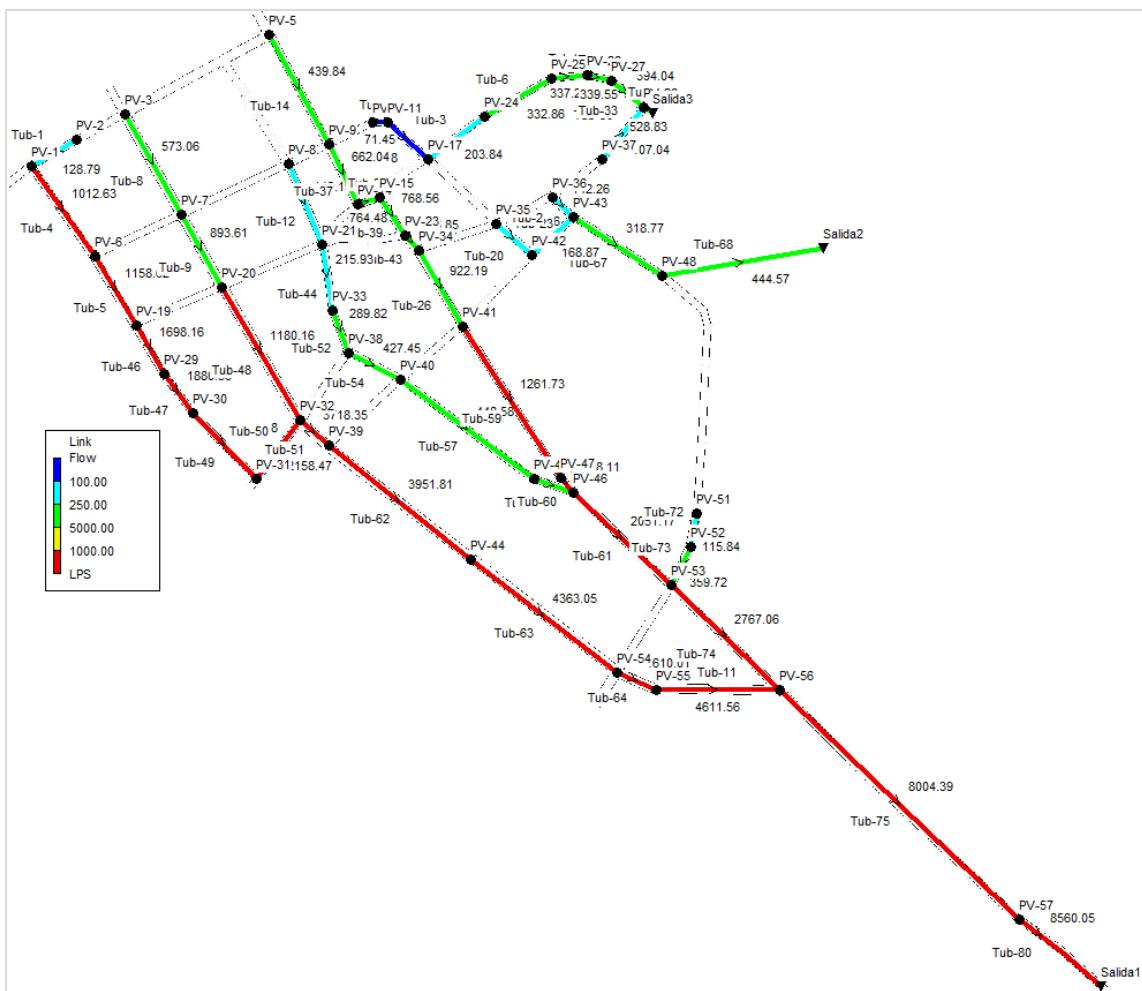
Figura 22. **Hidrograma de salida 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 23 se muestran el caudal en cada tramo del sistema de alcantarillado pluvial de la propuesta 1. Se indican los valores en litros por segundo de cada tramo, a los 27 minutos de iniciado el evento, donde ocurre la máxima escorrentía. La clasificación se muestra por rangos representados por colores, donde azul representa caudal menor a 100 L/s y rojo caudal mayor a 1000 L/s.

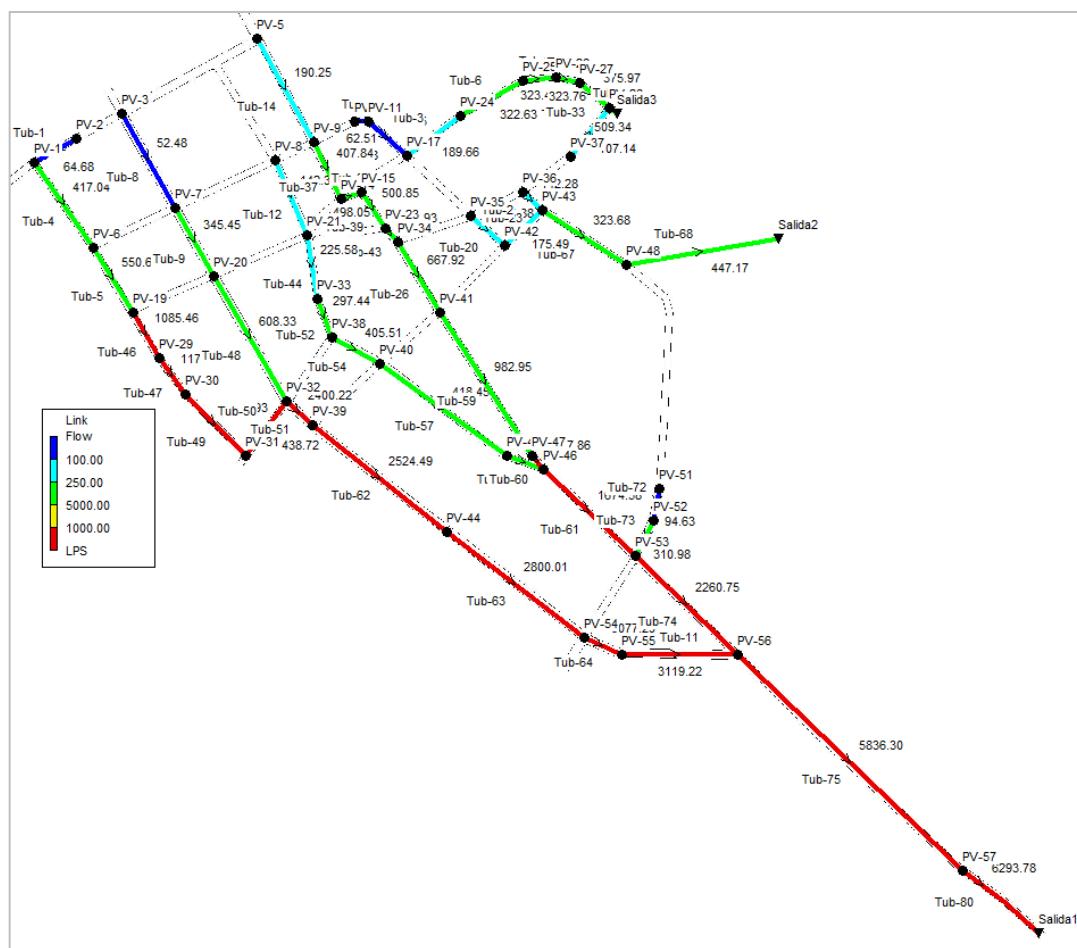
Figura 23. Caudal en sistema de colectores propuesta 1



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

En la figura 24 se muestran el caudal en cada tramo del sistema de alcantarillado pluvial de la propuesta 2. Se indican los valores en litros por segundo de cada tramo, a los 27 minutos de iniciado el evento, donde ocurre la máxima escorrentía. La clasificación se muestra por rangos representados por colores, donde azul representa caudal menor a 100 L/s y rojo caudal mayor a 1000 L/s.

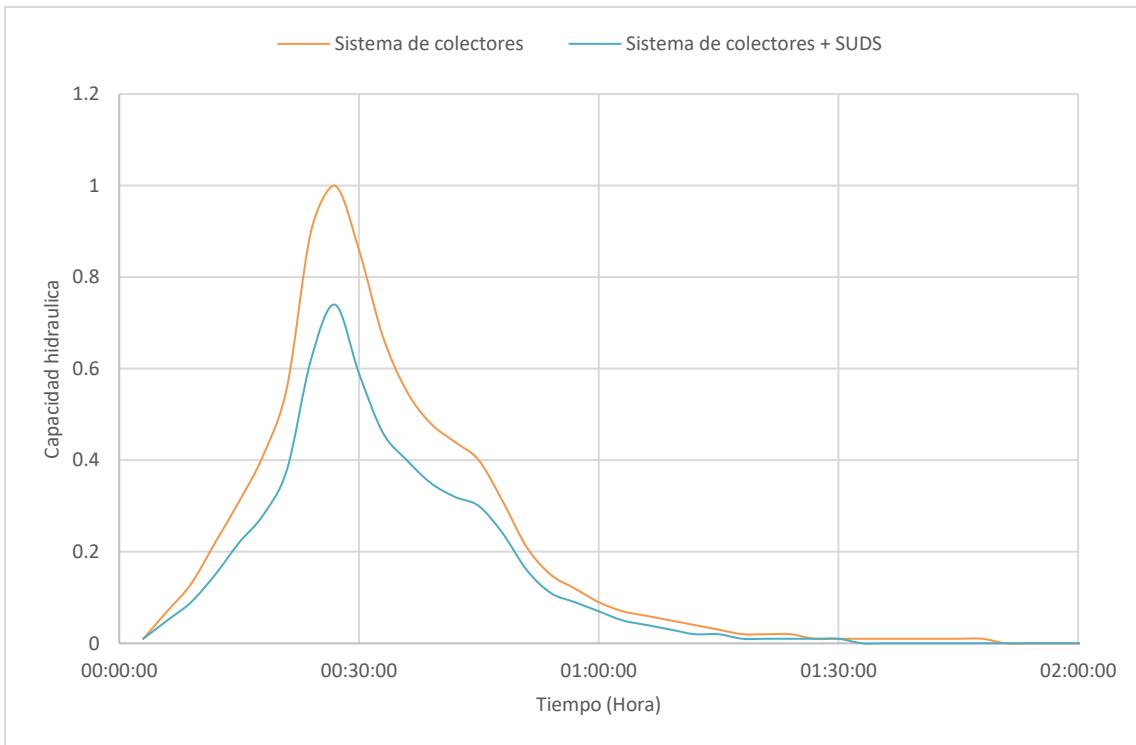
Figura 24. Caudal en sistema de colectores propuesta 2



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM

En la figura 25 se hace una comparación de la capacidad hidráulica del colector Tub-63, siendo este colector el más crítico en la propuesta 1. En esta figura se compara la propuesta 1 donde se considera la implementación de colectores y la propuesta 2 donde se contempla sistema de colectores incluyendo SUDS.

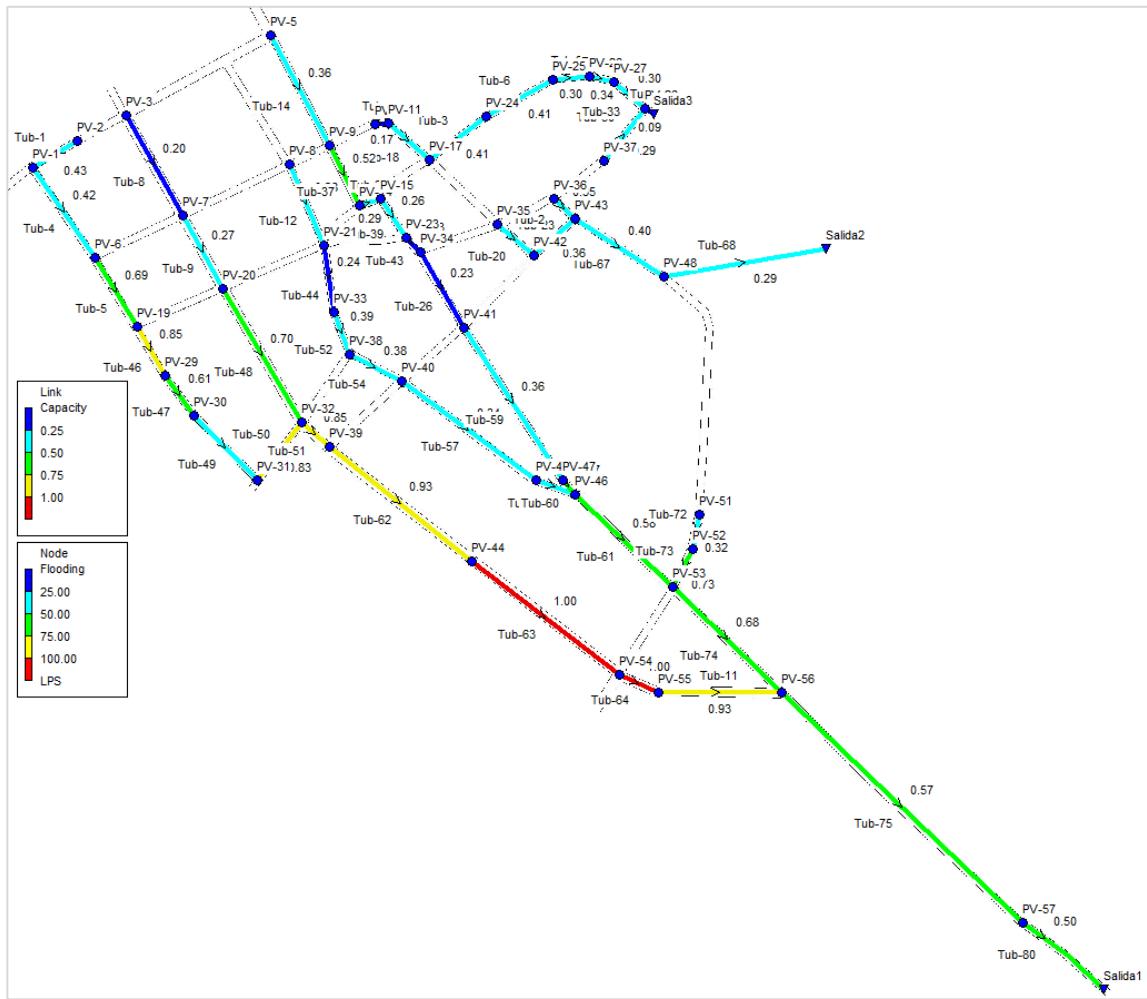
Figura 25. **Capacidad hidráulica colector Tub-63**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 26 se muestra la capacidad hidráulica de cada tramo del sistema de alcantarillado pluvial de la propuesta 1. Se indican valores adimensionales a los 27 minutos de iniciado el evento.

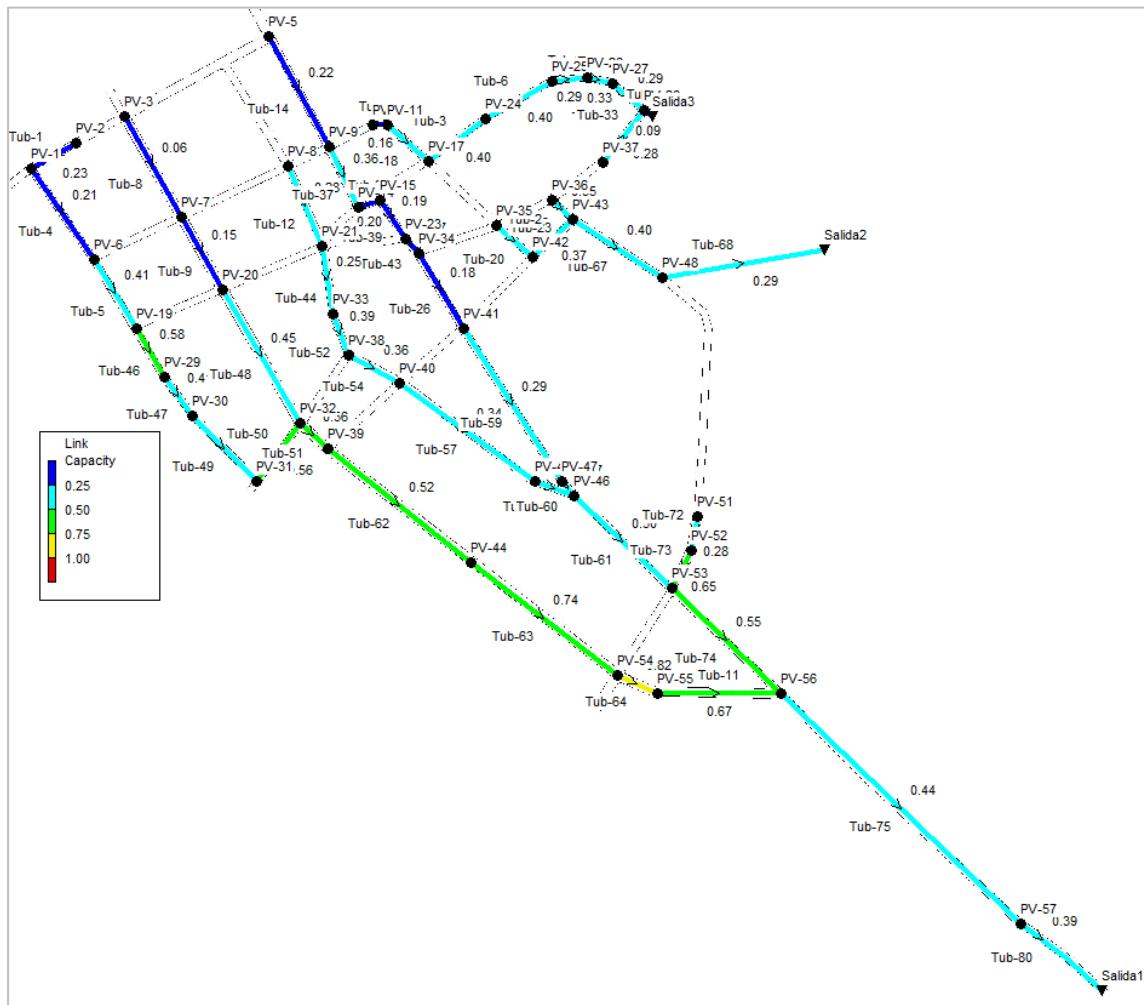
Figura 26. Capacidad hidráulica e inundación en pozos propuesta 1



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

En la figura 27 se muestra la capacidad hidráulica de cada tramo del sistema de alcantarillado pluvial de la propuesta 2. Se indican valores adimensionales a los 27 minutos de iniciado el evento.

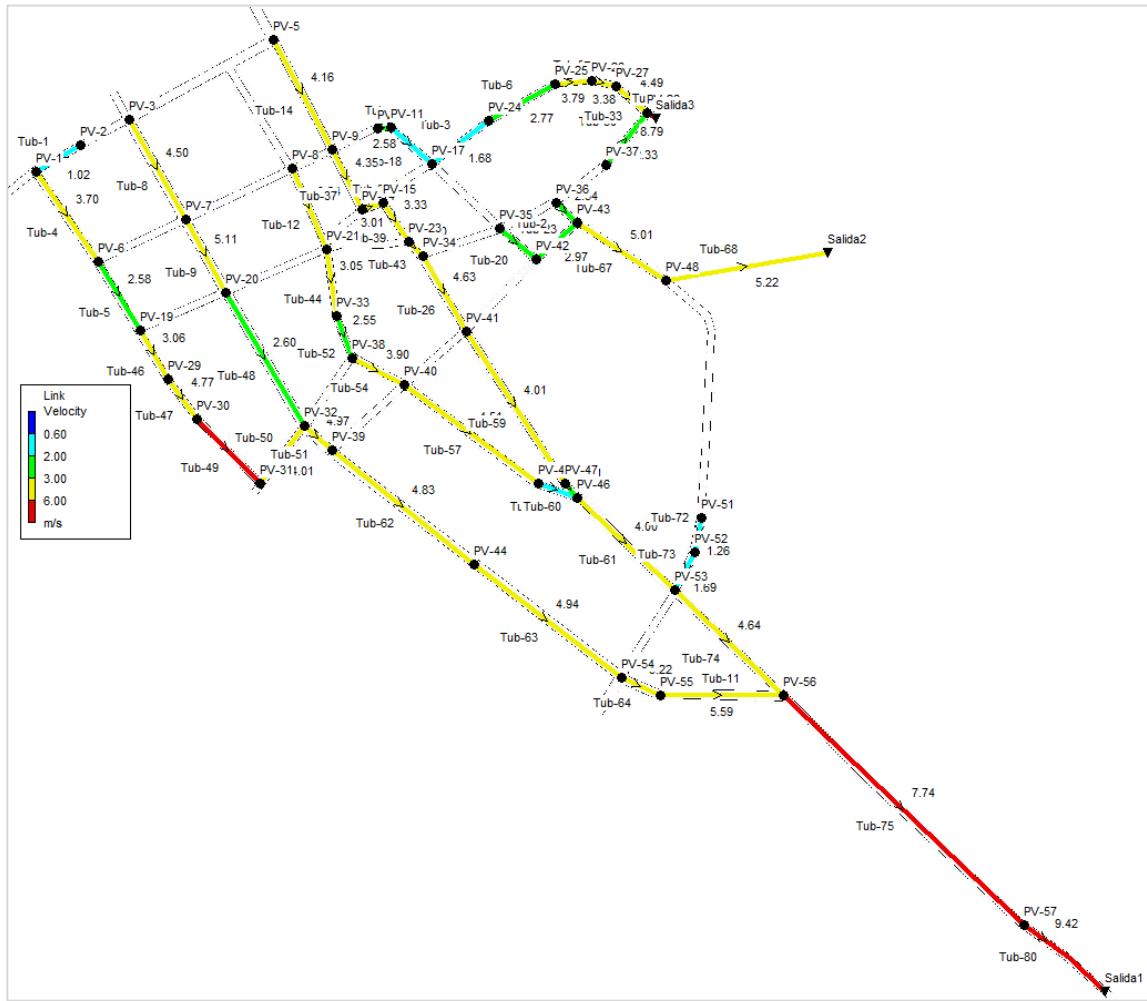
Figura 27. Capacidad hidráulica e inundación en pozos en propuesta 2



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

En la figura 28 se muestra la velocidad de la escorrentía en cada tramo del sistema de alcantarillado pluvial de la propuesta 1. Se indican valores en metros por segundo, 27 minutos de iniciado el evento.

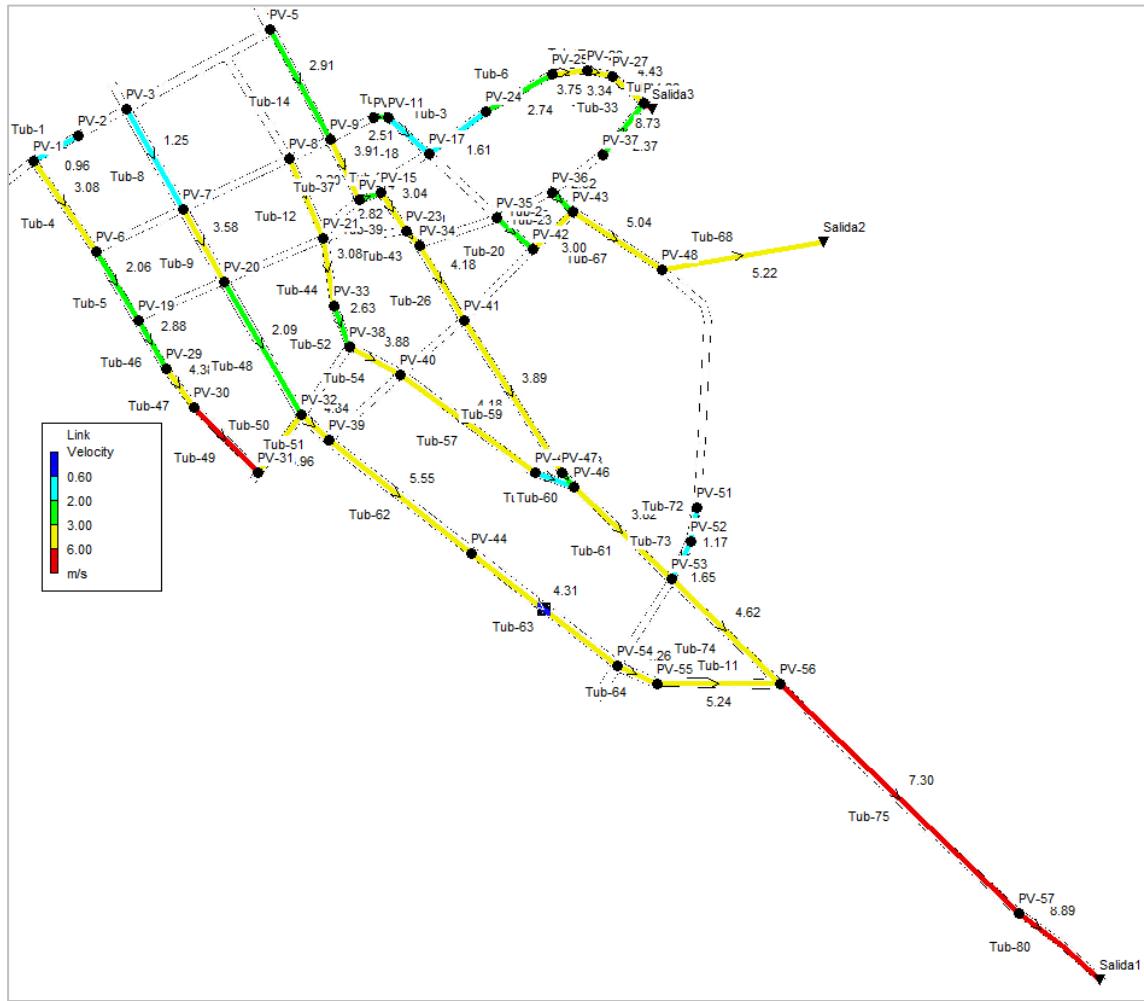
Figura 28. **Velocidad en colectores en la propuesta 1**



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

En la figura 29 se muestra la velocidad de la escorrentía en cada tramo del sistema de alcantarillado pluvial de la propuesta 2. Se indican valores en metros por segundo, 27 minutos de iniciado el evento.

Figura 29. **Velocidad en colectores propuesta 2**



Fuente: elaboración propia, empleando SWMM.

3.3. Gestión de aguas pluviales en el área urbana del municipio de Cajolá

Para la gestión de los servicios de drenaje de aguas pluviales en el área urbana del municipio de Cajolá la entidad encargada es la municipalidad, siendo ello base a considerar en esta parte del estudio.

3.6.1. Gestión actual del servicio de drenaje

Actualmente la dependencia municipal encargada del servicio de alcantarillado sanitario es la oficina de Agua Potable y Drenaje Municipal, esta dependencia municipal centra acciones en el servicio de agua potable (acciones operativas y de mantenimiento), mientras en temas de alcantarillado sanitario únicamente en acciones de mantenimiento correctivo, el sistema pluvial es un tema que la municipalidad no le ha prestado atención y que actualmente genera una serie de problemas principalmente inundaciones.

Esta falta de atención al sistema de alcantarillado pluvial es evidente principalmente por los siguientes puntos:

- Alcantarillado. El sistema de alcantarillado existente en el área urbana y en la periferia del mismo está diseñado para aguas residuales, por la inexistencia del alcantarillado pluvial es posible la conexión ilícita de estas aguas al sistema sanitario, por ende, la capacidad hidráulica se ve reducida en relación a la cantidad de agua que transporta. La mayor parte del alcantarillado sanitario es de tubería de concreto y en su mayoría fue construido hace aproximadamente 30 años. Mientras para el agua pluvial por carecer de un sistema de alcantarillado específico para estas aguas, utilizan la sección de calle como canal para el transporte de la escorrentía.
- Saneamiento. El municipio cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales con filtros percoladores, esta planta recibe las aguas residuales del área urbana del municipio y sus alrededores, incluyendo la parte norte de la microcuenca, que en época de lluvia esta planta recibe un caudal mayor dado la conexión ilícita de las aguas pluviales.

- Sistema tarifario. El sistema tarifario de los servicios que presta la municipalidad únicamente contempla el cobro de agua potable, que corresponde a Q. 15.00 mensuales por 30 m³. Teniendo el servicio de alcantarillado sanitario sin ninguna tarifa.
- Calidad de los servicios. Por el periodo de vida útil de los materiales utilizados en la mayoría del drenaje sanitario, y por la capacidad hidráulica superada de la tubería, principalmente en el lado noroeste del área urbana se requiere mantenimiento correctivo frecuente, siendo en promedio 6 durante un año, para el drenaje sanitario. Mientras la carencia de un sistema específico para el manejo y transporte ordenado de las aguas pluviales y la nula gestión hace que la escorrentía provoque serios problemas urbanos.
- Catastro. Por el mayor enfoque en agua potable de la dependencia municipal encargada de los servicios agua y drenaje se ha dejado en el olvido este servicio. Por lo tanto, el municipio carece de un catastro de usuarios conectados al sistema de drenaje, además de carecer de información de toda la red de drenaje que existe en el área urbana y área rural del municipio. Esto facilita la conexión ilícita de agua pluvial al sistema de drenaje sanitario.

3.6.2. Priorización de gestión

Para satisfacer la demanda de un servicio de drenaje pluvial se necesita además de la construcción de un sistema para el manejo y control de las aguas de lluvia, se necesita una gestión que pueda administrar y operar este servicio de manera eficiente y de calidad.

Para la prestación de servicios eficientes y de calidad se requiere una dependencia municipal específica en agua potable y drenaje (sanitario y pluvial) con personal capacitado, con una estructura organizacional establecida que cumpla con la demanda operativa y de mantenimiento que requieren estos servicios, además de contar con presupuesto para de la formulación de proyectos/programas encaminados hacia la sostenibilidad del servicio.

3.6.3. Propuesta de modelo de gestión de aguas pluviales en el área urbana del municipio de Cajolá

El Código Municipal establece que el municipio debe regular y prestar los servicios públicos municipales de su circunscripción territorial y, por lo tanto, tiene competencia para establecerlos, mantenerlos, ampliarlos y mejorarlos. Además, establece que las tasas y contribuciones deberán ser fijadas atendiendo los costos de operación, mantenimiento y mejoramiento de calidad y cobertura de servicios.

Para lograr estos objetivos se debe cumplir lo siguiente:

- Dependencia municipal especializada. La autoridad máxima debe nombrar personal calificado para desempeñar adecuadamente las funciones encomendadas, lo mismo que garantizar la estabilidad de los funcionarios operativos de la dependencia.
- Drenaje pluvial. Para este servicio la municipalidad debe evaluar la construcción del alcantarillado pluvial en donde se debe establecer su construcción por fases. El sistema de alcantarillado pluvial debe cumplir la demanda hidráulica requerida ante un evento de lluvia con un periodo de retorno no menor a 10 años. Además, incluir tecnologías de sistemas

urbanos de drenaje sostenible SUDS en proyectos de infraestructura municipal y privada (edificios públicos, calles, parques, entre otros).

- Herramientas legales. Generar instrumentos normativos municipales en materia de construcción y drenaje, además de la elaboración del plan de ordenamiento territorial del municipio.
- Calidad del servicio. Para un servicio de calidad es necesario la programación de actividades de mantenimiento preventivo para todos los elementos que componen el sistema pluvial y sanitario. Por lo que se deben considerar lo siguiente:
 - Elaboración de manuales de operación y mantenimiento de los servicios públicos de la dependencia municipal.
 - Programas de educación encaminadas al uso y cuidado de los servicios de drenaje de la municipalidad.
- Viabilidad financiera. La dependencia municipal de Agua Potable y Drenaje Municipal debe contar con los recursos financieros adecuados para operar, mantener y expandir los servicios. Estos recursos, deben estar incluidos en los planes operativos anuales y multianuales de la municipalidad.
- Sistema tarifario. El sistema tarifario debe estructurarse para que los cobros por uso de los servicios de drenaje cubran los costos de operar, mantener y expandir eficiente y oportunamente los servicios.
- Recursos humanos. La municipalidad debe contar con mecanismos de permanente actualización y entrenamiento de su personal en todo lo

referente a todas las operaciones que se derivan del cumplimiento de sus funciones.

En la tabla IX se presenta un plan de gestión para abordar el servicio de agua pluvial de manera estratégica, el cual contempla los objetivos a seguir, los resultados a esperar, productos y los principales responsables.

Tabla IX. Plan de gestión del sistema de drenaje pluvial

Objetivos	Resultados	Productos	Responsables
		Dependencia municipal de agua y drenaje con personal capacitado	Municipalidad
		Mayor número de personal de la dirección para cubrir	
Fortalecer la dependencia municipal de agua y drenaje que permita el manejo y operación de los sistemas de drenaje sanitario y pluvial	Para el 2025 la municipalidad contará con una dirección municipal especializada en agua y saneamiento drenaje sanitario y pluvial	actividades administrativas, operativas y de mantenimiento.	Municipalidad
		Manual de funciones establecido y aplicado en la dirección municipal.	Municipalidad
		Reglamento aprobado mediante acuerdo municipal y publicado en el diario oficial.	Municipalidad COCODE
		Tarifa establecida sostenible para el sistema de alcantarillado sanitario y pluvial.	Municipalidad COCODE

Continuación tabla IX.

	Reglamento aprobado mediante acuerdo municipal y publicado en el diario oficial.	Municipalidad COCODE
	Tarifa establecida sostenible para el sistema de alcantarillado sanitario y pluvial.	Municipalidad COCODE
Crear una normativa legal con un enfoque de derechos y obligaciones de usuarios y la municipalidad.	Para el 2027 se contará con un reglamento del servicio de drenaje sanitario y pluvial.	Definido los derechos y obligaciones de los usuarios en cuanto al uso del sistema de drenaje.
	Educación en cuanto al uso adecuado de los sistemas de drenajes	Municipalidad
	Incentivos establecidos por la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible.	Municipalidad

Continuación tabla IX.

Crear un sistema de catastro del servicio de drenaje sanitario y pluvial	Implementación de SIG para el catastro	Municipalidad
	Para el 2027 el municipio contará con un catastro actualizado de usuarios con sistemas de manejo de agua pluvial	Contar con equipo de cómputo y personal capacitado para el área.
		Actualización constante de nuevos usuarios.
Proveer servicio de drenaje pluvial en el área urbana	Colectores principales del área urbana construidos	Municipalidad CODEDE
	Para el 2030 la cobertura de drenaje pluvial a nivel urbano es del 50 %	Drenaje separativo en el área urbana del municipio.
		Proveer servicios de drenaje eficientes y de calidad.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Situación actual del sistema de drenaje pluvial en el área urbana

La microcuenca del área urbana con la condición actual genera un volumen de escorrentía de 19,590 m³ que es el 53.48 % del total de lluvia que precipita en la cuenca, esta reducción se debe a la infiltración que ocurre en las áreas permeables del área de estudio, que mayormente es permeable en la periferia del casco urbano pero que actualmente drena hacia este sector.

Los hidrogramas del área de estudio muestran que la mayor escorrentía se genera para la salida 3, que coincide con el punto más bajo de la microcuenca, donde drena la mayor parte de las microcuenca. En la salida 1 se genera un caudal máximo de 9.8 m³/s que ocurre 27 minutos iniciado la lluvia de diseño. En la salida 2 el caudal máximo es 0.7 m³/s que al igual que en la salida 1 ocurre al mismo tiempo, mientras en la salida 3 el caudal máximo ocurre a los 24 minutos iniciado el evento, generando un caudal máximo de 0.1 m³/s.

La escorrentía generada en la microcuenca drena directamente a las calles y estas las transporta hacia los puntos de descarga, el caudal máximo se genera en los últimos tramos de la salida 1, donde se presenta la máxima escorrentía, en la figura 28 se demuestra que los tramos del lado oeste del área urbana presentan caudales mayores a 1.0 m³/s por la conexión directa que tiene ese lado de la cuenca con las áreas del lado norte. Mientras en las salidas 2 y 3 el caudal generado es menor a 1.0 m³/s debido a que el área que drena por el sector es relativamente menor a la salida 1.

Por lo anterior los niveles de escorrentía en las calles varía significativamente entre cada una de las salidas, otro factor que interviene significativamente es la sección de cada tramo de la calle que difiere entre cada uno. Por lo que los niveles de agua pluvial en las salidas 2 y 3 es menor 0.10 m y 0.05 m respectivamente. Estos niveles de agua para el periodo de retorno considerado no sobrepasan el nivel máximo que puede transportar, dado que el nivel máximo a estos dos tramos es de 0.10 m que corresponden a la altura de bordillos de calle.

Mientras en la salida 1, el nivel de agua alcanza un máximo de 0.29 m que sobrepase la altura máxima de bordillo de ese tramo que es de 0.20 m, lo que significa que ocurre desbordamiento de agua pluvial en los últimos tramos de la salida. Este desbordamiento ocurre entre 21 a 48 minutos de iniciado la lluvia. Por lo que la capacidad hidráulica se ve sobrepasado en ese tiempo, tal como se observa en la figura 29 y 31.

En la figura 30 muestra la relación del nivel de agua en función del caudal de la salida 1, en donde se ve que la capacidad hidráulica de la calle se ve sobrepasado cuando el caudal sobrepasa los $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ en ese tramo.

4.2. Propuesta de manejo del agua pluvial en el área urbana

El desempeño de la subcuenca del área urbana se analiza para los dos casos propuestos. La propuesta 1 genera un volumen de escorrentía de $11,850 \text{ m}^3$ que representa el 53.84 % del volumen total de lluvia, mientras la propuesta 2 es de 8770 m^3 en escorrentía del total de $22,007 \text{ m}^3$ de volumen total de lluvia.

En la figura 32, se hace la comparación de los hidrogramas de salida para la propuesta de sistema de colectores y propuesta de sistema de colectores con SUDS, el caudal de escorrentía máximo ocurre 27 minutos iniciado el evento de lluvia para los dos casos, el caudal de escorrentía máximo es de $8.6 \text{ m}^3/\text{s}$ y $6.9 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente y donde hay una disminución del 26.5 % de la propuesta con SUDS con relación al sistema donde solo se considera sistema de colectores. A partir de los 12 minutos la propuesta con SUDS representa una disminución considerable del caudal en la salida, llegando hasta 50 minutos, a partir de este tiempo la diferencia es mínima, por lo que el caudal de salida para ambos casos es similar.

En la figura 33, se observa el caudal en cada tramo de la tubería para el tiempo de máxima respuesta de subcuenca, Los colectores 75 y 80 transportan la máxima escorrentía que corresponden a la salida 1. En el lado oeste de la subcuenca para los colectores 62, 63, 64 y 55 transportan caudales mayores a $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ este debido a que toda el área que corresponde a ese lado de la cuenca se concentra en la salida 1. Mientras en la salida 2 y 3 los caudales no superan los $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ debido a que el área de cada una de las salidas es relativamente menor al de la salida 1.

Con la implementación de SUDS en la propuesta 2 se observa una disminución del caudal en todos de los tramos de los colectores, en el colector Tub-4 el caudal es menor a $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ que es menor a la propuesta 1 donde el caudal es mayor a este valor. En el lado este de la cuenca en la salida 2 y 3 no existe mayor variación debido a que el área es menor y es densamente poblada por lo que la implementación de los SUDS propuestos es limitada.

La capacidad hidráulica de la mayoría de los colectores en la propuesta 1 no llega al 100 %, a excepción en los colectores Tub-63 y Tub-64, por lo tanto,

estos colectores son los más críticos. Mientras en la propuesta con SUDS ningún tramo de la tubería llega a presurizarse dado que la capacidad hidráulica de los colectores cubre la demanda con el caudal más crítico. Pudiendo con ello trabajar con diámetros de tubería menores a los propuestos.

La capacidad hidráulica del colector Tub-63 se presenta en la figura 35, donde para el diámetro propuesto se llega al 100 % de la capacidad del colector a los 27 minutos iniciado el evento, mientras con la implementación de los SUDS se llega a una capacidad hidráulica máxima del 74 %, por lo que el tramo más crítico no se llega a presurizar con la propuesta 2.

La velocidad en los colectores se presenta en la figura 38 y 39, esta velocidad en la propuesta 1 llega a valores máximos de 9.4 m/s en el colector Tub-80, mientras ese mismo tramo en la propuesta 2 es de 8.9 m/s, donde la diferencia de velocidades no es considerable, y que esta disminución responde a la disminución del caudal en ese tramo. Mismo comportamiento ocurre en los colectores Tub-49 y Tub-75 en donde en ambas propuestas sobrepasan los 6 m/s.

4.3. Gestión de aguas pluviales en el área urbana del municipio de Cajolá

La dependencia municipal de Agua Potable y Drenaje actualmente carece de un plan de gestión de aguas residuales y más aún carece de un sistema de manejo de aguas de lluvia, y por ende nula gestión, ya que principalmente se centran en la operación del sistema de agua potable. Esto ocurre porque no se cuenta con personal idóneo en las áreas asignadas, ni existe un plan municipal para contrarrestar estas debilidades en la prestación del servicio de drenaje sanitario y pluvial.

Es evidente esta falta de interés en el servicio de drenaje sanitario y pluvial, ya que en los últimos años no ha habido intervención en infraestructura de drenaje en el área urbana, esto trae consigo una serie de problemas de capacidad hidráulica ya que en la parte norte la expansión urbana va en crecimiento y con ello la expansión en longitud del drenaje sanitario, pero no en capacidad.

En cuanto al sistema tarifario por los servicios prestados, únicamente el servicio de agua potable tiene establecido una tarifa, pero que actualmente no cubre costos de operación, mucho menos costos de mantenimiento, siendo este servicio subsidiado por la municipalidad. En cuanto al sistema de drenaje sanitario únicamente existe un costo único de conexión más no una tarifa, siendo otro servicio subsidiado.

Otro problema evidente es la falta de información de los servicios que presta la municipalidad, el cual al carecer de un catastro no se tiene el control del número de usuarios conectados a los sistemas de agua, mucho menos de drenaje.

Para contrarrestar este problema es necesario implementar un sistema de drenaje exclusivo para el agua de lluvia, con esto se lograría disminuir las correntadas en las calles, pero además se necesita de una gestión municipal para ofrecer este servicio de una manera eficiente y de calidad.

Por lo tanto, se deben considerar los siguientes aspectos:

Establecer una dependencia municipal con una estructura que permite atender el servicio de drenaje sanitario y pluvial de manera específica logra generar acciones encaminadas hacia la gestión del servicio de manera

sostenible, porque con ello se podría definir y proponer proyectos y/o programas de manejo de agua pluvial, además de proponer instrumentos legales a nivel municipal para los servicios de drenaje.

Un sistema de manejo de aguas pluviales no solo debe ser la construcción del sistema de alcantarillado pluvial, sino contemplar también el uso de tecnologías SUDS, para aliviar los excesos de caudal, y reducir la magnitud de obras de infraestructura municipal.

Mientras los instrumentos legales propuestos deberían contener lineamientos específicos al cambio de uso de suelos, de tal modo que las acciones individuales o específicas puedan responder a los planes municipales en torno al agua de lluvia. De modo que urbanizar no afecte notablemente al comportamiento del agua de lluvia.

La viabilidad financiera municipal del servicio que puede prestar la comuna consiste no solo únicamente en disponer de recursos financieros para la operativización del servicio, más bien consiste en generar recursos a través de un sistema tarifario capaz de cubrir costos que requiera la prestación del servicio en calidad, incluyendo costos de expansión futura del servicio.

CONCLUSIONES

1. Un plan de gestión de aguas pluviales del área urbana del municipio de Cajolá no contempla solo infraestructura del sistema de drenaje pluvial, más bien consiste en una serie de acciones encaminadas a la gestión del servicio por la municipalidad a través de una dependencia municipal capacitada para la atención del servicio de manera eficiente y de calidad.
2. El sistema de drenaje pluvial actual del área urbana del municipio de Cajolá no cuenta con sistema de alcantarillado para transportar estas aguas, siendo las principales calles las que transportan esta escorrentía hacia las descargas, por lo que la capacidad hidráulica de las calles es limitada provocando con ello inundaciones en la parte suroeste de la subcuenca.
3. La implementación de una red de alcantarillado pluvial tradicional en el área urbana del municipio de Cajolá genera una mayor escorrentía que un sistema donde se incluyan los sistemas urbanos de drenaje sostenible, por lo que el caudal en la salida es atenuado cuando se implementan estos sistemas de manejo de agua pluvial, reduciendo con ello riesgos de inundación.
4. Una gestión orientada a contar con un servicio de calidad, eficiente y sostenible será posible a medida que se adopten acciones estratégicas y ordenadas, con roles definidos en la administración municipal, con un base legal definida y aprobada para el servicio de alcantarillado pluvial y un sistema tarifario sostenible.

RECOMENDACIONES

1. Propiciar el seguimiento al plan de gestión planteado de aguas pluviales a través de la dependencia municipal para operativizar acciones establecidas en el plan.
2. Considerar la topografía de la cuenca del área urbana para rehabilitar y habilitar desfogues de agua pluvial en la parte norte del municipio hacia los cauces naturales, logrando con ello menor área de la subcuenca con desfogue de escorrentía en la parte urbana.
3. Regular a través de reglamentos y/o ordenanzas a nivel municipal el cambio de uso de suelos, considerando tecnologías de bajo costo que puedan implementarse en zonas comerciales y residenciales, ejerciendo la autonomía que la Constitución Política de la República garantiza al municipio, establecida en el artículo 3 del Código Municipal.
4. Elaborar un plan de ordenamiento territorial para contrarrestar el crecimiento desordenado, definiendo zonas de expansión urbana, y que se pueda proveer de servicios de calidad en las zonas de crecimiento establecidos en el plan.

REFERENCIAS

1. Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de Superficie*. México: Limusa, S.A.
2. Bonilla, L. F. (2019). *Evaluación de la influencia de los sistemas de drenaje urbano sostenible en la reducción del riesgo de inundación urbana* (Tesis de licenciatura). Universidad de los Andes, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/44738>.
3. Bustamante, E. (2018). *Disponibilidad de Agua de escorrentía en la captación Huacaríz del Río Mashcón, Generada a Partir de Información Climática* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
4. Cahuana, A., y Yugar, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233* (Tesis de licenciatura). Universidad Mayor de San Simón, Bolivia. Recuperado de <https://civilmbh.files.wordpress.com/2013/11/hidrology-san-simon.pdf>.
5. Centanaro, G. E. (2020). *Estructuras más apropiadas para países tropicales con intensidades de lluvias altas*. Colombia: Universidad de los Andes. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/18150>.

6. Chow, V., Maidment, D., y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
7. Cicle Integral de l'Aigua. (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*. Valencia, España: Ajuntament de València.
8. Cifuentes, A. (2018). *Prestación de servicios municipales, aspectos administrativos y jurídicos* (Tesis de licenciatura). Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
9. Congreso Nacional del Medio Ambiente (2018). *Agua y ciudad sistemas urbanos de drenaje sostenible*. Madrid, España: Autor.
10. Construction Industry Research and Information Association (2015). *The SuDS Manual*. Londres, Inglaterra: Autor.
11. Decreto Número 11-2002. Ley de Consejo de Desarrollo Urbano y Rural. Diario de Centroamérica. Guatemala. 12 de marzo de 2002.
12. Decreto Número 12-2002. Código Municipal. Diario de Centroamérica. Guatemala. 02 de abril de 2002.
13. García., Y. C., Montoya., N. J., y Rodríguez Hernández, D. I. (2013). *Diseño del sistema de drenaje pluvial para el casco urbano del municipio de La Concepción-Masaya. Managua* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Nicaragua. Recuperado de <https://repositorio.unan.edu.ni/5008/>.

14. Garcia, E., Ibáñez, M. P., y Mosqueira, G. (2012). *Análisis crítico de la problemática y las soluciones adoptadas a nivel Europeo en la gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos* (Tesis de maestría). Universidad de Zaragoza, España. Recuperado de http://observatoriaigua.uib.es/repositori/suds_analisis_2012.pdf.
15. Hernandez, S. A., y Macea, F. A. (2014). *Investigación para el desarrollo de sistemas urbanos de drenaje sostenible (Suds) en la ciudad de Bogotá* (Tesis de licenciatura). Universidad Católica de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1744/1/Investigaci%C3%B3n-desarrollo-SUDS-Bogot%C3%A1.pdf>.
16. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*. Bogotá, Colombia: Autor.
17. Jimenez, A. F., y Joya, J. L. (2015). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (Suds) como gestión integral en la regulación y control de aguas lluvias; caso de estudio sector en la Ciudad de Bogotá*. (Tesis de licenciatura). Universidad Católica de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/87857>.
18. Mendez, R. (2014). *Implementación de nuevas ecuaciones de separación de flujo base para la modelación del volumen de escorrentía al método de estimación de crecientes desarrollado por*

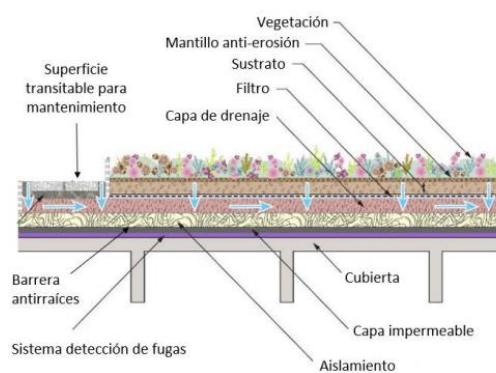
Coronado Triana (Tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia.

19. Municipalidad de Cajolá. (2019). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Cajolá, Quetzaltenango*. Guatemala: Autor.
20. Municipalidad de Quetzaltenango. (2019). *Plan de ordenamiento territorial del municipio de Quetzaltenango*. Quetzaltenango: Autor.
21. National Oceanic and Atmospheric Administration (1 de febrero, 2019). Water cycle. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/freshwater/water-cycle>.
22. Orozco, P. A. (2016). *Alternativas Para el manejo de aguas pluviales en medios urbanos. Estudio de caso: implementación y manejo de los canales pluviales en las cuencas del Salitre y Tintal en el marco del proceso de recuperación río Bogotá 2000-2014* (Tesis de licenciatura). Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, Colombia. Recuperado de <https://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/12714/OrozcoRoa-PaulaAndrea-2016.pdf?sequence=3>.
23. United States Environmental Protection Agency (5 de octubre, 2021). Stormwater Management Model. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.epa.gov/>.

24. Universidad de Alicante. (2020). *Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes*. Alicante, España: Universidad de Alicante.

ANEXOS

Anexo 1. Esquema de cubiertas vegetadas



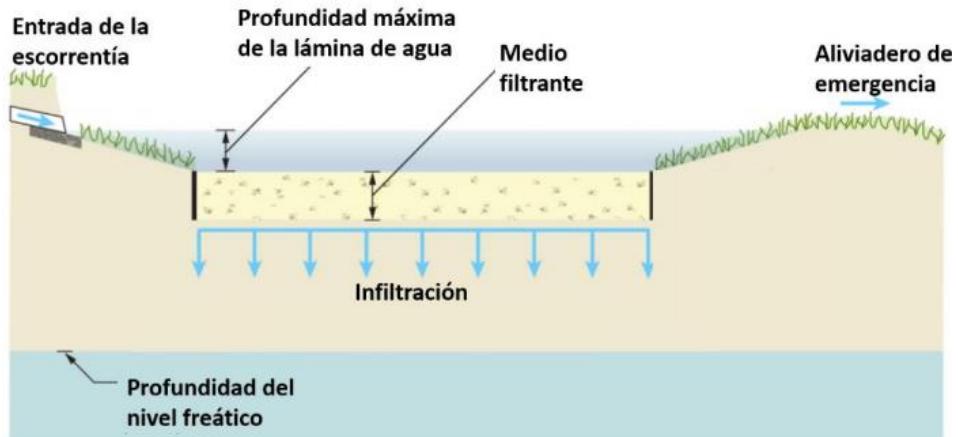
Fuente: Cicle Integral de l'Aigua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 2. Esquema de parterres inundables



Fuente: Cicle Integral de l'Aigua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 3. Esquema de balsas de detención



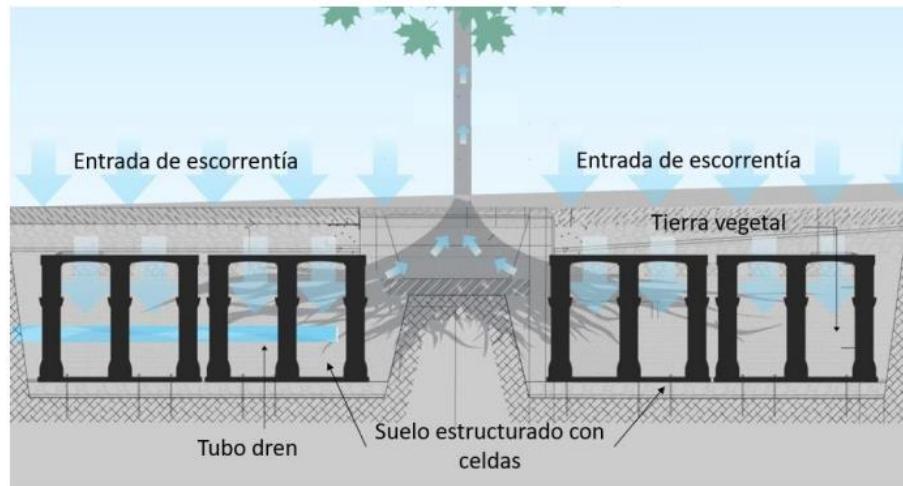
Fuente: Cicle Integral de l'Aigua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 4. Esquema de cunetas vegetadas



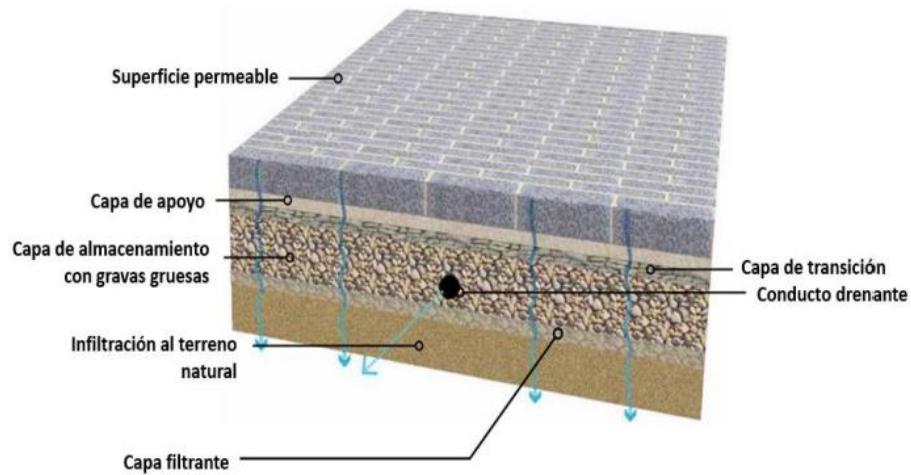
Fuente: Cicle Integral de l'Aigua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 5. Esquema de alcorques estructurales



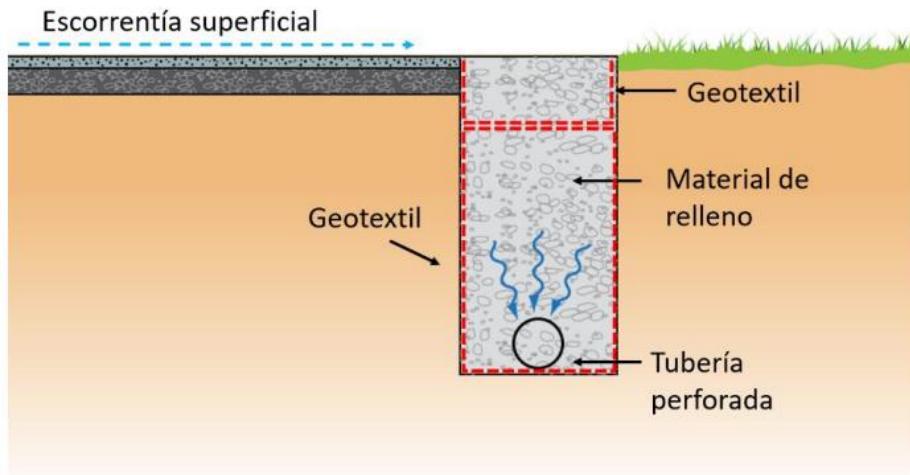
Fuente: Cicle Integral de l'Aigua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 6. Esquema de pavimentos permeables



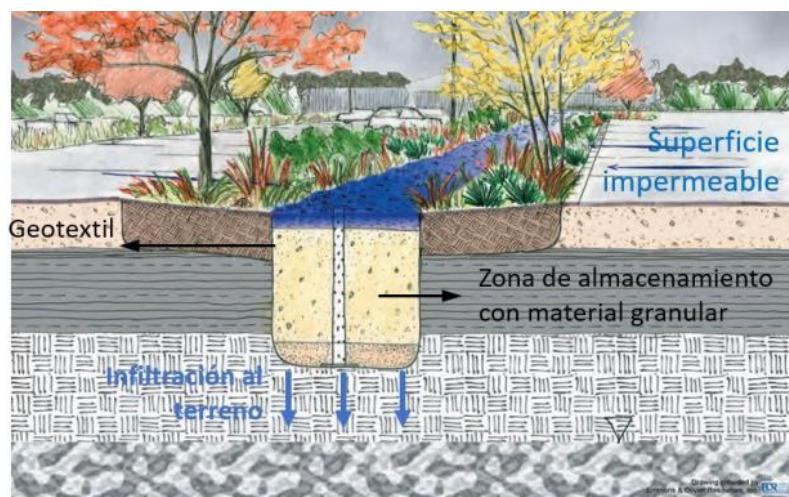
Fuente: Cicle Integral de l'Aqua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 7. Esquemas de drenes filtrantes



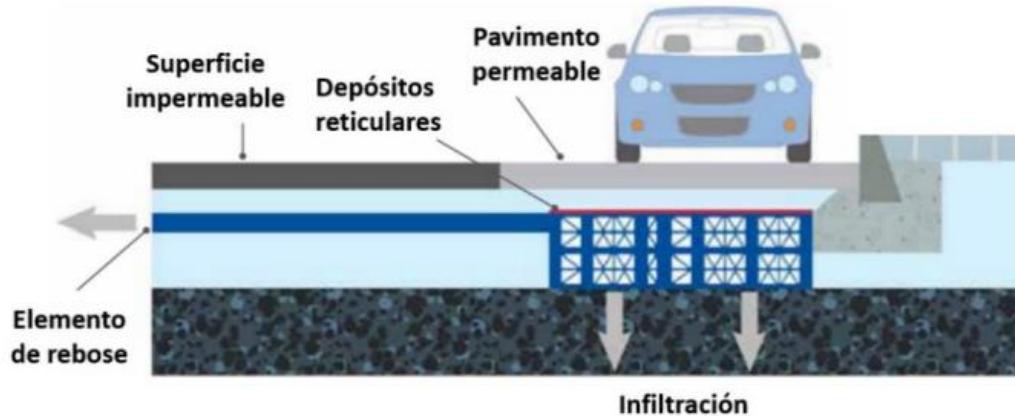
Fuente: Cicle Integral de l'Aigua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 8. Esquema de zanjas de infiltración



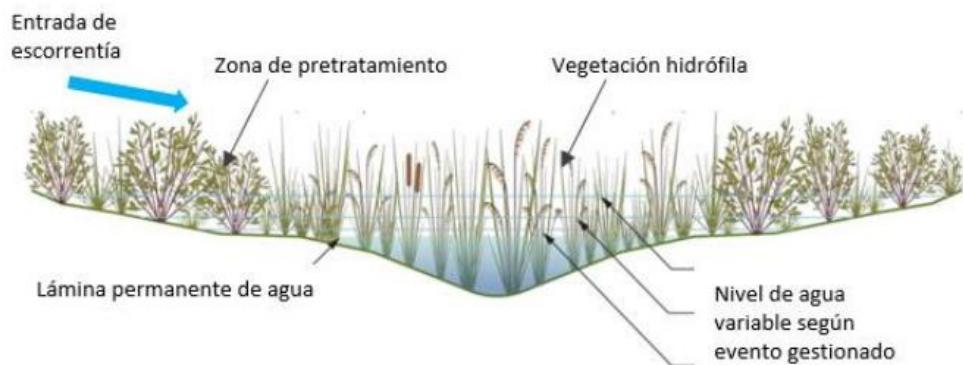
Fuente: Cicle Integral de l'Aqua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 9. Esquema de depósitos reticulares



Fuente: Cicle Integral de l'Aigua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Anexo 10. Esquema de humedales artificiales



Fuente: Cicle Integral de l'Aigua (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.