

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**“EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE
URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA
AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

AUTOR:

Bach. Cristhian Paul Robles Rodríguez

ASESOR:

Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez

CAJAMARCA, PERÚ

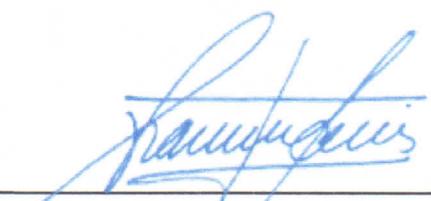
2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA

1. Investigador: Cristhian Paul Robles Rodríguez
DNI: 72536440
Escuela Profesional: INGENIERÍA CIVIL
2. Asesor: LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ
Facultad: INGENIERÍA
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación: "EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023"
6. Fecha de evaluación: 06/05/2025
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 19%
9. Código Documento: oid: 3117:456421909
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 06/05/2025

 <hr/> <p>FIRMA DEL ASESOR Nombres y Apellidos LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ DNI: 26693344</p>	 <p>Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofía FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 06/05/2025 22:24:18-0500</p> <hr/> <p>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</p>
---	--



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA - 2023.

ASESOR : Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0222-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 20 de mayo de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **treinta días del mes de mayo de 2025**, siendo las quince horas (3:00 p.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A - Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Vocal : Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
Secretario : Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA - 2023**, presentado por el Bachiller en Ingeniería Civil **CRISTHIAN PAUL ROBLES RODRÍGUEZ**, asesorado por el Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 07 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS. DIECIOCHO (En letras)

En consecuencia, se lo declara Aprobado con el calificativo de DIECIOCHO acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las Dieci Seis horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.


Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Presidente


Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
Vocal


Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz.
Secretario


Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Asesor

DEDICATORIA

A mis padres Gilberto y Ana por su
incondicional y permanente amor.

A mis hermanos Katherin y Fabricio que
siempre estuvieron apoyándome.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez, mi asesor, por su valiosa orientación, constante apoyo y comprensión brindados a lo largo del desarrollo de esta investigación.

A los docentes que fueron parte de mi formación en la Universidad Nacional de Cajamarca.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
JUSTIFICACIÓN	2
ALCANCE	3
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS.....	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	5
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES.....	6
2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES	7
2.2. BASES TEÓRICAS	7

2.2.1. HIDROLOGÍA URBANA.....	7
2.2.2. CICLO HIDROLÓGICO URBANO.....	8
2.2.2.1. Medición de lluvia	9
2.2.2.2. Análisis de tormentas	9
2.2.3. PERIODO DE RETORNO	11
2.2.4. CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA (IDF)	12
2.2.5. TORMENTAS DE PROYECTO A PARTIR DE CURVAS IDF	14
2.2.5.1. Lluvia constante o en bloque	14
2.2.5.2. Tormenta triangular	15
2.2.5.3. Tormenta tipo Sifalda.....	16
2.2.5.4. Método de los bloques alternados.....	17
2.2.6. PÉRDIDAS DE PRECIPITACIÓN	18
2.2.6.1. Pérdidas por almacenamiento en depresiones	18
2.2.6.2. Pérdidas por infiltración:	19
2.2.7. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	23
2.2.8. MÉTODO RACIONAL.....	25
2.2.8.1. Método racional para cuenca menores a 10 Km ²	26
2.2.8.2. Método Racional Modificado	27
2.2.9. HIDRÁULICA Y DRENAJE URBANO	30
2.2.9.1. Proceso de urbanización.....	30
2.2.9.2. Impactos de la infraestructura urbana.	30
2.2.9.3. Influencia del desarrollo urbano en el proceso de escorrentía	31

2.2.10. COMPONENTES DE DRENAJE PLUVIAL URBANO	33
2.2.10.1. Estructuras de captación.....	33
2.2.10.2. Estructuras de Conducción	34
2.2.11. SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE:	38
2.2.11.1. Estrategias para la implementación de SUDS	41
2.2.12. NORMATIVA PERUANA SOBRE SUDS	42
2.2.13. VOLUMEN DE TRATAMIENTO PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE AGUA (Vc)	43
2.2.13.1. Determinación de la profundidad de lluvia (hp).....	43
2.2.13.2. Determinación del factor de escorrentía K.....	44
2.2.13.3. Determinación de hw_{qcv} a partir de la profundidad de lluvia (hp)	44
2.2.13.4. Determinación de Vc	44
2.2.14. TIPOS DE SUDS.....	44
2.2.14.1. Jardines Filtrantes	44
2.2.14.2. Pavimentos permeables	49
2.2.14.3. Tanques de retención	55
2.2.15. MODELO DE SIMULACIÓN SWMM.....	56
2.2.15.1. Esquema de modelación usado por SWMM	57
2.2.15.2. Elementos visuales del sistema de drenaje y su representación con SWMM.....	58
2.2.15.3. Métodos de cálculo	59
2.2.15.4. Herramientas de modelación LID.....	65

2.2.16. Diagrama de flujo del proceso de generación de caudales de descarga en SWMM	66
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	67
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	69
3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	69
3.1.1. Ubicación Geográfica	69
3.1.2. Ubicación política.....	69
3.2. Metodología de la investigación	72
3.2.1. Tipo de investigación.....	72
3.2.2. Nivel	72
3.2.3. Método de investigación	72
3.3. Población de estudio.....	72
3.4. Muestra de estudio	72
3.5. Unidad de análisis	73
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	73
3.6.1. Técnicas de recolección de datos	73
3.6.2. Instrumentos.....	73
3.7. Técnicas de procesamiento de la información, tratamiento y análisis de datos... 74	
3.8. PROCEDIMIENTO	74
3.8.1. Primera etapa (Recopilación de información).....	75
3.8.1.1. Topografía	75
3.8.1.2. Imágenes satelitales	75

3.8.1.3. Infraestructura vial	75
3.8.1.4. Clima	76
3.8.1.5. Uso del suelo	76
3.8.1.6. Información pluviométrica	77
3.8.2. Segunda etapa (Modelo del sistema actual de drenaje pluvial urbano en SWMM).....	78
3.8.2.1. Procesamiento de datos necesarios para el software SWMM.	78
3.8.2.2. Modelo del Sistema Actual de Drenaje Urbano en SWMM	82
3.8.3. Tercera etapa (Modelo del sistema de drenaje urbano con SUDS).....	84
3.8.3.1. Sistema 01: Pavimentos filtrantes.....	84
3.8.3.2. Sistema 02: Jardines Filtrantes	86
3.8.3.3. Sistema 03 tanque de retención	87
3.8.3.4. Modelación de los SUDS en SWMM.....	93
3.8.3.5. Asignación de los LID a las subcuencas de drenaje en SWMM	99
3.8.3.6. Planteamiento y dimensionamiento del sistema de drenaje para los SUDS	100
3.9. Presentación de resultados	104
3.9.1. Resumen de las tipologías SUDS	104
3.9.2. Hidrogramas del sistema de drenaje urbano con y sin SUDS	105
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	109
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Pérdidas por almacenamiento en depresiones (valores en mm)	19
Tabla 2 Condiciones antecedentes de humedad en función de la precipitación.....	21
Tabla 3 Grupo hidrológico de suelo según el SCS (USDA)	21
Tabla 4 Números de Curva para cada tipo de uso de la tierra en condiciones antecedentes de humedad de tipo II.....	22
Tabla 5 Fórmulas para el cálculo del tiempo de concentración.....	24
Tabla 6 Coeficientes de esorrentía método racional	27
Tabla 7 Pendientes mínimas para la calzada o pista	36
Tabla 8 n de Manning para cunetas de calles y calzadas	37
Tabla 9 Metodologías de cálculo hidráulico empleados por el programa SWMM	64
Tabla 10 Coordenadas referidas al Datum Wgs84 Zona 17 Sur	69
Tabla 11 Tiempo de concentración con Kirpich (1940)	78
Tabla 12 Tiempo de concentración con California Culverts Practica (1942)	79
Tabla 13 Tiempo de concentración con Federal Aviation Administración (1970).....	79
Tabla 14 Método del bloque alterno para tiempo de retorno 25 años.....	81
Tabla 15 Dimensionamiento de pavimento permeable	85
Tabla 16 Resumen de diseño de pavimentos permeables	85
Tabla 17 Dimensionamiento de jardín filtrante	86
Tabla 18 Resumen de diseño de jardines filtrantes.....	86
Tabla 19 Cálculos capacidad de calle tramo 1 – 4.....	87
Tabla 20 Cálculos capacidad de calle tramo 5 – 10.....	88
Tabla 21 Cálculos capacidad de calle tramo 11 – 14.....	88
Tabla 22 Cálculos capacidad de calle tramo 15 – 18.....	89

Tabla 23	Resumen comparación de la capacidad de calle con el caudal pico	89
Tabla 24	Cálculos capacidad de calle jirón Los Gorriones	92
Tabla 25	Cálculos capacidad de calle jirón Alfredo Rocha tramo 1 – 2.....	92
Tabla 26	Cálculos capacidad de calle jirón Alfredo Rocha tramo 3 – 4.....	93
Tabla 27	Resumen comparación de la capacidad de calle con el caudal pico	93
Tabla 28	Resumen de tipologías SUDS	104
Tabla 29	Tabla comparativa de resultados obtenidos	105
Tabla 30	Tabla comparativa de resultados obtenidos	106
Tabla 31	Tabla comparativa de resultados obtenidos	107
Tabla 32	Tabla comparativa de resultados obtenidos	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación gráfica a detalle del ciclo hidrológico urbano	9
Figura 2 Riesgo de que el evento de diseño sea superado al menos una vez durante la vida útil.....	12
Figura 3 Curva Intensidad–Duración–Frecuencia tipo	14
Figura 4 Tormenta de diseño con lluvia constante	15
Figura 5 Tormenta de proyecto triangular	16
Figura 6 Tormenta de proyecto tipo Sifalda.....	17
Figura 7 Tormenta de proyecto tipo bloque alterno	18
Figura 8 Hipótesis del método racional	25
Figura 9 Grado de impermeabilización de acuerdo con el proceso de urbanización	32
Figura 10 Tipos de sumidero.....	34
Figura 11 Sección transversal de cunetas.....	35
Figura 12 Ecuación de Manning en la determinación de caudales en cunetas triangulares	37
Figura 13 Ecuación de Manning en la determinación de caudales en cunetas triangulares	38
Figura 14 Ecuación de Manning en la determinación de caudales en cunetas triangulares	38
Figura 15 Comparación de objetivos entre los sistemas convencionales de drenaje y los Sistemas de Drenaje Sostenible.	39
Figura 16 Respuesta hidrológica de una cuenca según grado de desarrollo urbano.	40
Figura 17 Esquemas del funcionamiento de la cadena de gestión del agua.....	42
Figura 18 Jardines filtrantes	45
Figura 19 Diagrama de flujo del dimensionamiento de jardines filtrantes	48

Figura 20 Esquema de un pavimento poroso con infiltración.....	50
Figura 21 Esquema de un pavimento poroso con infiltración parcial	50
Figura 22 Esquema de un pavimento poroso sin infiltración.....	51
Figura 23 Diagrama de flujo del dimensionamiento de alcorques inundables.....	54
Figura 24 Modelo conceptual del sistema de drenaje urbano	57
Figura 25 Disposición de objetos visuales para representar un sistema de drenaje en SWMM.....	58
Figura 26 Esquema de depósito usado en SWMM.....	60
Figura 27 Aproximaciones de solución a las ecuaciones de Saint-Venant.....	63
Figura 28 Diagrama de flujo del proceso de generación de caudales de descarga en SWMM.....	66
Figura 29 Plano de localización a nivel nacional	70
Figura 30 Plano de localización a nivel regional.....	70
Figura 31 Plano de localización a nivel distrital.....	71
Figura 32 Plano de localización de la zona de estudio	71
Figura 33 Plano topográfico	75
Figura 34 Lluvia, temperatura máxima y temperatura mínima para la ciudad de Cajamarca.....	76
Figura 35 Plan de ordenamiento territorial 2016-2026.....	77
Figura 36 Curvas IDF	80
Figura 37 Hietograma mediante el método de bloque alterno para el periodo de retorno 25 años	82
Figura 38 Esquema de la zona de estudio en SWMM 5.2	83
Figura 39 Sección transversal av. Hoyos Rubio Cuadra 10.....	87
Figura 40 Sección transversal av. Hoyos Rubio Cuadras 11 y 12.....	87

Figura 41 Sección transversal av. Hoyos Rubio Cuadras 13 y 14.....	88
Figura 42 Sección transversal av. Hoyos Rubio Cuadras 15 y 16.....	89
Figura 43 Estimación rápida del volumen de un depósito por diferencia con el máximo caudal	90
Figura 44 Cálculo del volumen de un depósito por diferencia con el máximo caudal..	91
Figura 45 Sección transversal jr. Los Gorriones	91
Figura 46 Sección transversal jr. Alfredo Rocha tramo 1 – 2.....	92
Figura 47 Sección transversal jr. Alfredo Rocha tramo 3 – 4.....	93
Figura 48 Parámetros LID, Superficie - Pavimento poroso	94
Figura 49 Parámetros LID, Pavimento - Pavimento poroso	95
Figura 50 Parámetros LID, Storage - Pavimento poroso	95
Figura 51 Parámetros LID, Superficie - Pavimento poroso	96
Figura 52 Parámetros LID, Superficie de los jardines filtrantes	97
Figura 53 Parámetros LID, suelo filtrante del jardín	98
Figura 54 Parámetros LID, capa de almacenamiento del jardín filtrante	98
Figura 55 Parámetros LID, drenaje del jardín filtrante.....	99
Figura 56 Elevación de aguas pluviales, solo con pozo húmedo	102
Figura 57 Hidrogramas en el punto de descarga	105
Figura 58 Hidrogramas en el punto de descarga jr. Los Gorriones.....	106
Figura 59 Hidrogramas jirón Alfredo Rocha tramo 1-2	107
Figura 60 Hidrogramas jirón Alfredo Rocha tramo 3 - 4	108

RESUMEN

Esta investigación, de tipo descriptivo – correlacional, de método cuantitativo y de diseño no experimental, el objetivo fue determinar el efecto de la implementación de tres sistemas urbanos de drenaje urbano sostenible (SUDS) en el caudal de descarga, en la avenida Hoyos Rubio, Cajamarca. Para ello, se delimitó la zona de estudio, la cual se encuentra en el sector Este de la ciudad de Cajamarca delimitada por el norte jirón Sta. Teresa de Journet, por el sur jirón Luis Ortiz, por el este jirón Armando Revoredo y por el oeste avenida vía de evitamiento norte. Luego, se inició con la recolección de información meteorológica, topográfica y catastral de la zona de estudio. Así, se identificaron y seleccionaron áreas para la ubicación de los SUDS, para este caso de estudio se consideraron tres: 1) Jardines Filtrantes, 2) Pavimentos Permeables y 3) Tanque de retención; posteriormente, se procesó esta información y mediante el Software de modelado para la gestión de aguas pluviales, conocido por sus siglas en inglés SWMM en su versión 5.2., se simuló el sistema existente de drenaje urbano para el periodo de retorno 25 años, y luego se simuló con la implementación de los tres SUDS, además se dimensionó un sistema de drenaje subterráneo que conecta los SUDS con estaciones de bombeo, regulando la descarga a la superficie mediante válvulas y bombas hidráulicas. Concluyendo, que los tres SUDS reducen los caudales picos en los puntos de descarga, siendo el tanque de retención en un periodo de retorno de 25 años los que mejor reducen el caudal pico un 11.97%.

Palabras clave: Escorrentía, Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible, Modelo de gestión de aguas pluviales (SWMM), caudal de descarga

ABSTRACT

This research, which is descriptive-correlational, quantitative in method, and non-experimental in design, aims to determine the effect of implementing three sustainable urban drainage systems (SUDS) on discharge flow in the Hoyos Rubio Avenue in Cajamarca. The study area, located in the eastern sector of Cajamarca city, was delimited by Santa Teresa de Journet Street to the north, Luis Ortiz Street to the south, Armando Revoredo Street to the east, and the North Bypass Avenue to the west. Meteorological, topographic, and cadastral information of the study area was collected to identify and select suitable locations for SUDS implementation. Three systems were considered for this study: (1) Rain Gardens, (2) Floodable Tree Pits, and (3) Retention Tanx; the collected data was processed using the Storm Water Management Model (SWMM) version 5.2. The existing urban drainage system was simulated for a 25-year return period. A new simulation was conducted after implementing the three SUDS, and an underground drainage system was designed to connect the SUDS with pumping stations, regulating the surface discharge through valves and hydraulic pumps. The study concluded that the three SUDS reduce peak flows at discharge points, with the retention tank providing the most significant reduction of 11.97% for a 25-year return period.

Key words: Runoff, Sustainable Urban Drainage Systems, Storm Water Management Model (SWMM), Discharge Flow.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Cajamarca ciudad, se localiza en la parte septentrional del territorio peruano a 2750 msnm, en base al CENSO del 2017 tiene de 218,741 habitantes, su tasa de crecimiento urbana es 1.99% y rural es de -0.65% respecto al CENSO del 2007. El clima predominante en la zona es seco, con días mayormente soleados o templados y noches frías. La temperatura máxima promedio se registra en el mes de septiembre (22.2 °C), mientras que la mínima promedio ocurre en julio (4.9 °C). El marzo, el mes con mayor precipitación, cuenta con un promedio de 118.78 mm de lluvia mensual. (SENAMHI, 2022)

El área de estudio se sitúa en el sector este y en la zona baja de la ciudad de Cajamarca, delimitada al norte por el jirón Sta. Teresa de Journet, por el sur jirón Luis Ortiz, por el este jirón Armando Revoredo y por el oeste avenida vía de evitamiento norte. El drenaje pluvial presenta problemas de cantidad, calidad y la falta de consideración por la biodiversidad En cuanto al volumen, los sistemas convencionales de drenaje tienen como fin evacuar rápidamente el agua de lluvia, para disminuir su impacto en las actividades diarias. No obstante, este enfoque suele derivar en problemas de inundación, especialmente en ausencia de un análisis hidráulico riguroso o frente a eventos de precipitación intensa, dado que dichos sistemas no cuentan con la capacidad necesaria para gestionar el caudal de escorrentía generado por superficies impermeables. Respecto a la calidad del agua, la escorrentía urbana suele estar altamente contaminada, ya que arrastra sedimentos y diversos contaminantes desde las superficies urbanas, lo que representa un serio problema ambiental. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo determinar el efecto de la implementación de tres sistemas urbanos de drenaje urbano sostenible (Jardines Filtrantes, Pavimentos Permeables y Tanque de retención) en el caudal de descarga, en la avenida Hoyos Rubio, Cajamarca.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La rápida expansión urbana que se ha experimentado en los años recientes ha provocado el aumento excesivo de las superficies impermeables, ocasionando un aumento en la escorrentía superficial y en consecuencia incrementando los caudales pico. Esta situación se manifiesta claramente en el área de estudio, ubicada en el sector Este y zona baja de la ciudad de Cajamarca, delimitada por el norte jirón Sta. Teresa de Journet, por el sur jirón Luis Ortiz, por el este jirón Armando Revoredo y por el oeste avenida vía de evitamiento norte. Qué actualmente presenta problemas de inundación recurrentes durante la época de lluvia. La cual se evidenció principalmente en la avenida Hoyos Rubio que, debido a las precipitaciones intensas, el nivel del agua supera la capacidad de las cunetas e ingresa hacia las veredas y posteriormente a algunas viviendas.

Con la creciente preocupación por las inundaciones y la degradación de la calidad del agua en entornos urbanos, los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) surgen como una alternativa eficiente y ambientalmente responsable para el manejo de la escorrentía pluvial.

¿Cuánto es el efecto de implementar tres Sistemas de Drenaje Sostenible en el caudal de descarga, de la avenida Hoyos Rubio en la ciudad de Cajamarca?

JUSTIFICACIÓN

Esta investigación aborda el drenaje urbano, presentando un procedimiento y los estudios necesarios para determinar el efecto de la implementación de tres sistemas urbanos de drenaje urbano sostenible (Jardines Filtrantes, Pavimentos Permeables y Tanque de retención) en el caudal de descarga, en la avenida Hoyos Rubio, Cajamarca. Mediante una herramienta de simulación computacional (SWMM 5.2.) que permite analizar el comportamiento de la escorrentía superficial en función de las características y elementos existentes en la zona.

ALCANCE

Se limita a determinar el efecto de la implementación de tres sistemas de drenaje urbano sostenible (Jardines Filtrantes, Pavimentos Permeables y Tanque de retención) en el caudal de descarga en la av. Hoyos Rubio, entre la vía de evitamiento norte y el jirón Armando Revoredo de la ciudad de Cajamarca en el año 2023. Para ello, se emplea la simulación en SWMM, herramienta que permite evaluar el comportamiento de los distintos datos que influyen en los sistemas de drenaje urbano.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la implementación de tres sistemas de drenaje urbano sostenible en el caudal de descarga en la avenida Hoyos Rubio, Cajamarca-2023.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reunir y examinar toda la información relevante sobre el sector en estudio.
- Analizar el comportamiento de la cuenca urbana mediante el modelo de gestión de aguas pluviales SWMM.
- Simular la implementación de tres sistemas de drenaje urbano sostenible.
- Obtener el hidrograma para el punto de descarga.

DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS

El Capítulo I, introducción, presenta la información esencial para definir los fundamentos de la investigación. En el Capítulo II, marco teórico, se incluyen los antecedentes del estudio, las bases teóricas y la definición de conceptos clave. Posteriormente, el Capítulo III, materiales y métodos, describe el procedimiento seguido, así como el tratamiento y análisis de datos para alcanzar los objetivos planteados. Luego, en el Capítulo IV, análisis y discusión de resultados, se presentan, explican y analizan los hallazgos obtenidos. Finalmente, el Capítulo V, conclusiones y recomendaciones, aborda el cumplimiento de los objetivos y ofrece sugerencias para futuras investigaciones.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Cubides & Santos (2018) en su artículo, concluyen que: la integración de estos sistemas con el drenaje urbano convencional permite reducir el caudal en toda la red. Esto se traduce en la disminución de la sección transversal e inclinaciones en la infraestructura proyectada, evitando la necesidad de excavaciones profundas y, a su vez, reduciendo los costos del sistema en su conjunto.

Medina Piza, Aguilar Rojas, & Calderón Gómez (2018) en su tesis, concluyen que: desde una perspectiva hidráulica, los SUDS tipo alcorques inundables y pavimentos porosos funcionan de manera parecida, ya que ambos captan directamente la escorrentía superficial, incorporan una capa pluvial de tratamiento o almacenamiento temporal, y disponen de un sistema de evacuación que puede realizarse por infiltración, retorno al alcantarillado o una mezcla de estos métodos. Por otro lado, debido a limitaciones constructivas, el tratamiento con pavimentos porosos requiere una infraestructura de mayor tamaño en comparación con los alcorques, y su eficacia se ve considerablemente afectada por la pendiente de la calle y las dimensiones de áreas que puede captar.

Bermúdez-Valero (2021) en su tesis, concluye que: las investigaciones sobre sistemas urbanos de drenaje sostenible en América Latina y el Caribe están en aumento en el último decenio. Sin embargo, estos estudios se han hecho realidad en unos pocos países de la región, con Colombia liderando el 44 % de los casos identificados, seguido de Brasil con el 36 %. México representa el 8 %, mientras que Argentina y Costa Rica contribuyen con el 4 % cada uno. Finalmente, Chile y Paraguay presentan una participación del 2 % respectivamente.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Ticahuanca Mamani (2022) en su tesis, concluyen que: en los barrios Las Begonias y Eben Ezer se identificaron áreas adecuadas para la adaptación de un diseño de drenaje pluvial sostenible. Se consideraron siete zonas abiertas donde es posible optimizar el sistema de drenaje, permitiendo la sustitución de un metro de ancho a lo largo de la calle por concreto permeable. Además, se contempló la instalación de trincheras de infiltración con dimensiones de un metro de ancho por cinco metros de longitud, y profundidades de 0,40 m y 0,50 m, respectivamente.

García Castillo y Miranda Requena (2021) en su tesis, concluyen que: la implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible contribuye principalmente a reducir la escorrentía máxima del sistema y a retrasar su llegada a las zonas más bajas. Además, favorece la presencia de áreas permeables que facilitan la infiltración del agua. En este contexto, dado que la cuenca urbana Poder Judicial es una cuenca ciega, resulta esencial establecer un sistema de evacuación que dirija el flujo hacia una red de alcantarillado o algún curso de agua natural.

Lezama Tisnado y Rodríguez De La Sota (2020) en su tesis, concluyen que: según las investigaciones revisadas, los sistemas más utilizados son los pavimentos permeables y los techos verdes, ambos con una implementación del 19 %, seguidos de las zonas de biorretención, que representaron el 15.9 %. En cuanto a la distribución geográfica de los estudios, la mayoría se desarrolló en América del Norte, con un 28.6 %, seguido por Asia Oriental, con un 25.4 %.

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES

Rojas Vásquez (2021) en su tesis, concluye que: la aplicación del diseño de la cámara de retención y acumulación de agua de lluvia se considera aceptable, ya que sus características permitieron evaluar la mejora del sistema de drenaje urbano sostenible en la zona de estudio. Gracias a este diseño, se optimizó la gestión del agua y se mejoró la entrega del volumen pluvial aguas abajo.

Merlo Romero y Soto Pedrera (2020) en su tesis, concluyen que: en Cajamarca, los sistemas de drenaje convencionales han superado su disposición operativa, sin poder gestionar entre un 17 % y 52 % de escorrentía adicional, debido a deficiencias de diseño y mantenimiento. A nivel global, los SUDS más implementados son pavimentos permeables, techos verdes, zanjas de infiltración y tanques de almacenamiento. En Perú, la normativa actual aún no define criterios claros para su selección, diseño y ejecución.

Tarrillo Vásquez (2023) en su tesis, concluye que: de las seis cuadras del jirón Los Sauces, cuatro (1, 3, 4 y 5) presentan deficiencias en el drenaje superficial, ya que el caudal de diseño supera el caudal operativo de las cunetas existentes, impidiendo una evacuación efectiva del agua.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. HIDROLOGÍA URBANA

Manuel Gómez Valentín (2007), en su libro, Curso de Hidrología Urbana, señala que el análisis hidrológico de cuencas urbanas demanda características particulares derivadas de su contexto. Estas cuencas, al ser considerablemente más pequeñas que las fluviales tradicionales, presentan caudales generalmente bajos, del orden de pocos metros cúbicos por segundo. No obstante, su principal distinción radica en la escala temporal: los procesos hidrológicos urbanos se desarrollan en intervalos muy cortos, medidos en minutos. Esta condición hace que las cuencas urbanas sean altamente sensibles a lluvias

intensas y de corta duración, las cuales pueden generar picos de caudal significativos incluso en áreas reducidas.

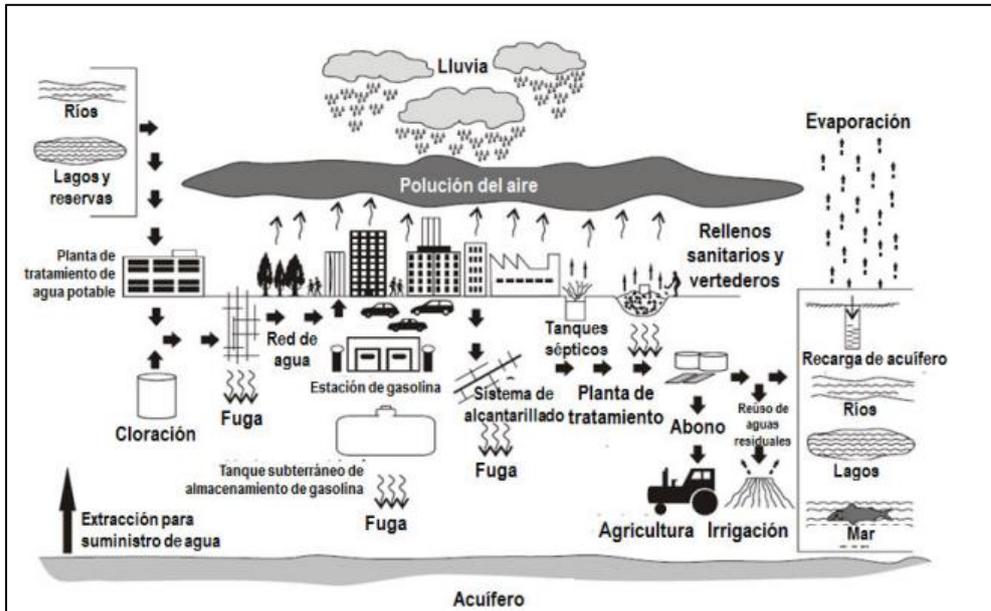
2.2.2. CICLO HIDROLÓGICO URBANO

En, *Introducción a la Hidrología Urbana*, el ingeniero Daniel Francisco Campos Aranda (2010), señala que el ciclo hidrológico, en términos generales, se interpreta como un esquema que describe cómo el agua se almacena y se mueve entre la biósfera, la atmósfera, la litósfera y la hidrósfera. Este ciclo está conformado por una serie de procesos fundamentales, tales como la evaporación, la transpiración, la condensación, la precipitación, la infiltración, la percolación y el escurrimiento, los cuales permiten el movimiento continuo del agua entre sus distintos reservorios, como océanos, lagos, ríos, suelos, glaciares, nieve, acuíferos y la atmósfera.

Aunque el proceso de urbanización, desarrollo industrial y el rápido aumento demográfico han modificado profundamente el entorno sin alterar y alterado la dinámica hidrológica de las cuencas, los principios estructurales del ciclo hidrológico permanecen inalterados. No obstante, en entornos urbanos, este ciclo se ve sustancialmente alterado debido a diversas intervenciones humanas, tales como los sistemas de: abastecimiento de agua para consumo humano, la evacuación de aguas de lluvia y el tratamiento de efluentes cloacales. Estas alteraciones introducen una mayor complejidad al funcionamiento del ciclo hidrológico, generando nuevas dinámicas e interacciones que resultan fundamentales para el análisis y manejo de los recursos hídricos.

Figura 1

Representación gráfica a detalle del ciclo hidrológico urbano



Nota. Tomado de Urban Cycle Processes and Interactions, por Marsalek et al., 2007.

2.2.2.1. Medición de lluvia

La medición de la lluvia se realiza comúnmente mediante el pluviómetro o el pluviógrafo, lo que nos proporciona información sobre la distribución espacial, frecuencia y cantidad de lluvia en una determinada zona. Los datos se expresan en milímetros de agua, que equivalen a la acumulación de agua en una superficie plana e impermeable durante la duración de la lluvia o solo en una parte de su período. Entonces, es necesario indicar que el pluviómetro, de uso común y sencillo, consiste en un recipiente cilíndrico metálico con una abertura superior, que recoge el agua mediante un embudo y la almacena en un colector para su posterior lectura. Por otro lado, los pluviógrafos ofrecen un registro continuo de la lluvia, permitiendo determinar el inicio y fin de la precipitación, así como su intensidad en todo momento (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019)

2.2.2.2. Análisis de tormentas

El análisis de tormentas resulta esencial en la proyección y desarrollo de infraestructura hidráulica y conservación de suelos, debido a que sus dimensiones están directamente

vinculadas a la magnitud y la frecuencia de las tormentas en la región para la cual se están diseñando. Por lo tanto, es crucial comprender la intensidad de las tormentas, es decir, la cantidad de precipitación por unidad de tiempo durante un intervalo determinado, y la recurrencia con la que se espera que ocurran tormentas de cierta magnitud. La elección del período de retorno está vinculada tanto a la vida útil esperada de la infraestructura como a su nivel de criticidad. Diseñar para eventos extremadamente raros puede implicar costos elevados que podrían no justificarse frente al nivel de riesgo que se pretende reducir. (Gómez Valentín, 2007)

2.2.2.2.1. Pluviograma

El análisis del pluviograma constituye una etapa inicial esencial en el estudio de tormentas. Implica la recopilación y organización de datos a partir de las bandas pluviográficas en tablas ordenadas. Luego, se crea un histograma basado en esta tabla para visualizar cómo evoluciona la lluvia en relación con el tiempo. Finalmente, se calcula la intensidad máxima para distintos intervalos de duración a partir de los datos recopilados en el pluviograma. (Abanto Plascencia, 2017)

2.2.2.2.2. Frecuencia

La evaluación estadística de eventos hidrológicos permite estimar la probabilidad de ocurrencia futura de fenómenos como la precipitación, la intensidad pluvial o los máximos caudales, a partir de registros históricos. Este procedimiento se apoya en métodos estadísticos que permiten determinar la magnitud esperada de un evento asociado a un determinado período de retorno. La precisión de los resultados está condicionada por la extensión y calidad de la serie de datos empleada, así como por la incertidumbre asociada a la elección de la distribución de probabilidad más adecuada. (Abanto Plascencia, 2017)

2.2.3. PERIODO DE RETORNO

Se define como el intervalo medio, en años, en el que un determinado caudal máximo de inundación puede alcanzarse o superarse al menos una vez. Bajo el supuesto de independencia entre eventos anuales, puede calcularse la probabilidad de ocurrencia durante un período de diseño de "n" años. La selección adecuada del período de retorno para una obra hidráulica debe considerar tanto la duración prevista de la infraestructura como el nivel de riesgo aceptado frente a eventos extremos. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2012)

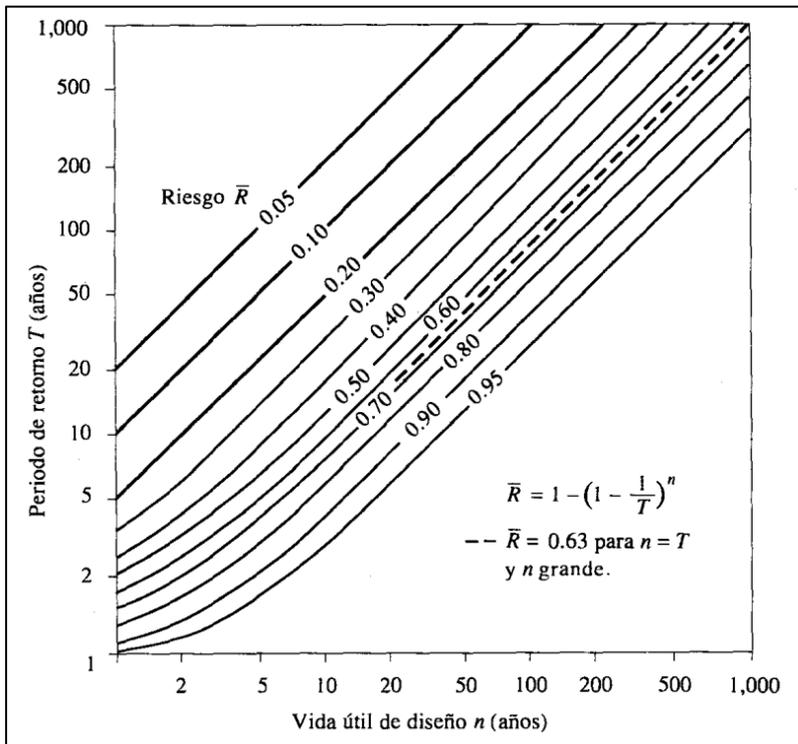
El riesgo para fallar aceptable en relación con el período de retorno y la vida útil de la estructura se establece mediante:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Si se considera que una estructura hidráulica tendrá una vida útil de n años, es posible utilizar la fórmula correspondiente para estimar el período de retorno T , estableciendo previamente un nivel de riesgo R . Este riesgo representa la probabilidad de que, en algún momento dentro de ese intervalo de tiempo, ocurra un evento cuya magnitud iguale o supere el caudal máximo asociado a una determinada inundación. De esta manera, el período de retorno se convierte en una herramienta clave para equilibrar la seguridad de la infraestructura con criterios económicos y técnicos, asegurando que el diseño contemple un grado razonable de protección frente a fenómenos extremos durante toda su vida útil.

Figura 2

Riesgo de que el evento de diseño sea superado al menos una vez durante la vida útil



Nota. Tomado de Hidrología Aplicada, por Chow, Maidment, & Mays, 1994.

Así mismo, según la Norma OS.060, del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2021) establece que los caudales de diseño para las obras de ingeniería destinada a drenar el volumen de precipitaciones de frecuencia moderada, es decir, con períodos de retorno de 2, 5, 10 o menos de 25 años, tienen como objetivo prevenir la inundación de edificios, carreteras y áreas adyacentes.

2.2.4. CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA (IDF)

Estas curvas representan visualmente cómo la intensidad de la precipitación cambia con relación a la duración del episodio de lluvias, y qué probabilidad existe de que dicho episodio de lluvias sea superado en términos de intensidad.

Según Manuel Gómez Valentín (2007) el proceso para obtener las curvas IDF es el siguiente:

(i) Reunir la información de precipitación registrados durante un largo período, preferentemente mediante hietogramas con intervalos temporales no mayores a 10 minutos.

(ii) Clasificar estos eventos de precipitación según distintos intervalos de duración.

(iii) Calcular, para cada lapso considerado, la serie de Intensidades Medias Máximas Anuales (IMMA), identificando la mayor intensidad promedio registrada en cada año para cada intervalo específico.

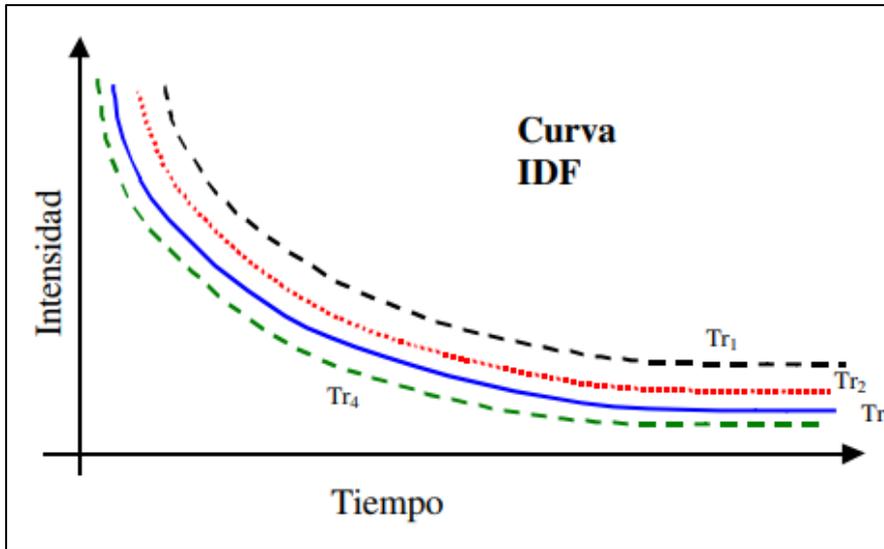
(iv) Aplicar una distribución de extremos, como la distribución de Gumbel, para cada uno de los intervalos de tiempo. Esto permite estimar las intensidades correspondientes a distintos períodos de retorno. Esto permite conocer la probabilidad de que una determinada intensidad de lluvia sea superada en un año dado.

(v) Con los valores obtenidos, se trazan las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para la estación analizada. Estas curvas conectan los puntos con igual período de retorno y permiten representar gráficamente la relación entre la intensidad de precipitación, la duración del evento y su frecuencia de ocurrencia.

En síntesis, el procedimiento implica recopilar de datos históricos de precipitación, calcular las intensidades medias máximas, estimar intensidades para distintos períodos de retorno, y finalmente, la elaboración de las curvas IDF, las cuales son fundamentales en la ingeniería hidrológica para el diseño de obras hidráulicas y el diseño adecuado del aprovechamiento del agua.

Figura 3

Curva Intensidad–Duración–Frecuencia tipo



Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

2.2.5. TORMENTAS DE PROYECTO A PARTIR DE CURVAS IDF

Las curvas IDF, al sintetizar datos históricos de precipitación en una cuenca, constituyen un insumo fundamental para la generación de la lluvia de proyecto que será empleada en los análisis hidrológicos. A través de su uso, ingenieros e hidrólogos pueden acceder a información clave sobre la interacción entre la magnitud de la precipitación, su duración y la frecuencia con la que se presenta, facilitando así el diseño y dimensionamiento de obras hidráulicas. (Gómez Valentín, 2007)

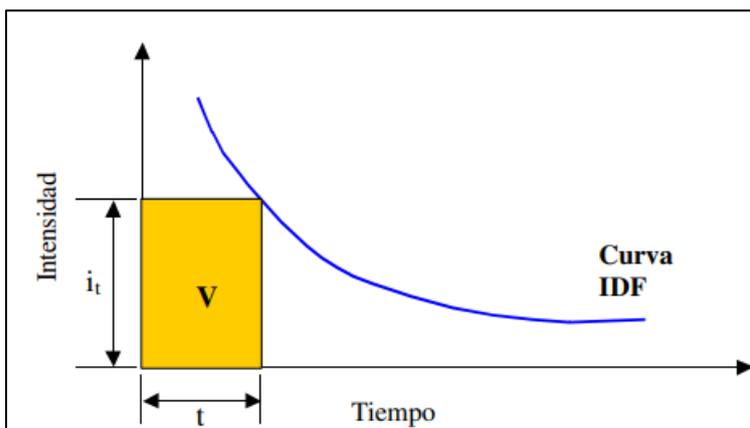
2.2.5.1. Lluvia constante o en bloque

De acuerdo con lo dicho por Gómez Valentín (2007), el diseño hidrológico más elemental parte del supuesto de una intensidad de precipitación uniforme durante todo el evento de lluvia. Esta hipótesis se fundamenta en el hecho de que los eventos que suelen provocar inundaciones son generalmente de corta duración, pero de gran intensidad. En el caso de cuencas pequeñas, se asume que el caudal máximo ocurre cuando la totalidad de la cuenca contribuye al escurrimiento, motivo por el cual se considera una intensidad de lluvia uniforme durante un intervalo de tiempo equivalente al tiempo de concentración de la

cuenca. Esta intensidad se determina a partir de la curva IDF correspondiente, considerando el período de retorno y un lapso igual al tiempo de concentración. De este modo, el Método Racional se interpreta como una aproximación que modela una tormenta de proyecto sencilla, caracterizada por una precipitación uniforme tanto en espacio como en tiempo.

Figura 4

Tormenta de diseño con lluvia constante



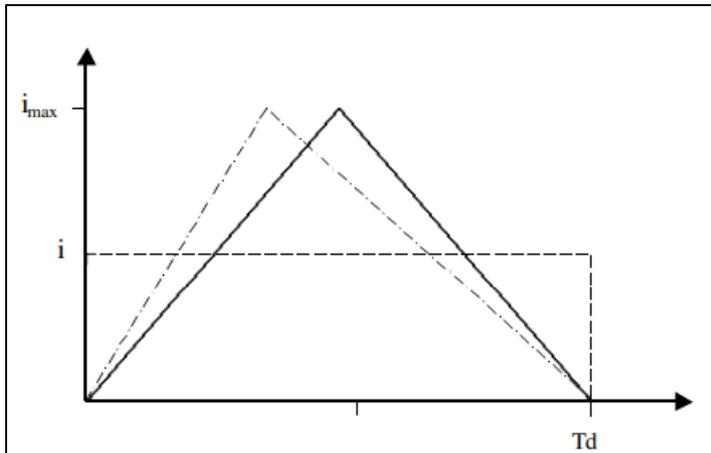
Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

2.2.5.2. Tormenta triangular

En cuencas pequeñas, una tormenta de proyecto con intensidad de lluvia constante es válida, pero en cuencas más grandes con mayores tiempos de concentración, esta aproximación se aleja de la realidad. Durante eventos de lluvia, las intensidades pueden variar considerablemente, y asumir lluvia constante puede distorsionar los resultados hidrológicos. Una solución sencilla es modelar la variabilidad temporal utilizando una distribución triangular o datos de curvas IDF, lo que reflejará de manera más precisa las condiciones climáticas reales y mejorará los resultados del análisis hidrológico. (Gómez Valentín, 2007)

Figura 5

Tormenta de proyecto triangular



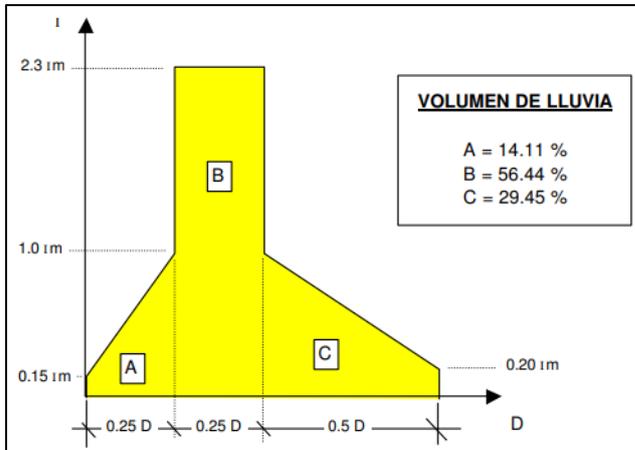
Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

2.2.5.3. Tormenta tipo Sifalda

En 1973, Sifalda propuso una modificación al concepto de tormenta de proyecto con intensidad de lluvia constante, incorporando variaciones temporales en su estructura. Esta propuesta consiste en añadir dos bloques en forma de trapecio, uno al inicio y otro al final de un tramo central con intensidad uniforme. La razón detrás de esta modificación radica en que, para duraciones de lluvia habituales (entre 30 y 60 minutos), la intensidad derivada de la curva IDF corresponde a un valor promedio para dicho intervalo, aunque durante periodos más breves (de 5 a 10 minutos) pueden registrarse intensidades significativamente mayores. De esta manera, Sifalda plantea un patrón modificado que permita representar mejor la variabilidad real de la precipitación en eventos de corta duración. (Gómez Valentín, 2007)

Figura 6

Tormenta de proyecto tipo Sifalda



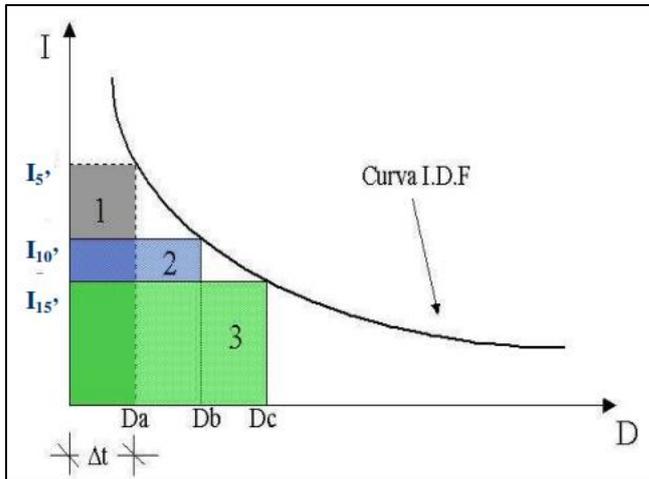
Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

2.2.5.4. Método de los bloques alternados

El método más empleado para la construcción de lluvias de diseño es el del bloque alternativo, el cual consiste en dividir la duración total del evento (D) en " n " intervalos de tiempo (Δt). Posteriormente, se utiliza la información de intensidades de precipitación (I) obtenida a partir de la curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para los distintos múltiplos de Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, $4\Delta t$, tal como se ilustra en la Figura 2.3. A partir de estas intensidades y sus respectivas duraciones, se calcula la precipitación acumulada. Finalmente, los bloques se reorganizan colocando el de mayor intensidad en el centro y distribuyendo los restantes, en orden descendente, de manera alternada hacia ambos lados. Este procedimiento permite construir un hietograma de diseño que refleja de manera representativa como la lluvia se distribuye a través de la duración del evento analizado. (Gómez Valentín, 2007)

Figura 7

Tormenta de proyecto tipo bloque alterno



Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

2.2.6. PÉRDIDAS DE PRECIPITACIÓN

La estimación de las pérdidas por almacenamiento en depresiones constituye una tarea compleja. En diversas cuencas experimentales se han obtenido datos de campo que permiten establecer una relación entre estas pérdidas y la pendiente media de la cuenca. De manera general, se puede indicar que dichas pérdidas suelen situarse en un rango de entre 2 y 4 mm de precipitación, incrementándose en terrenos de topografía plana o con pendientes reducidas, lo cual resulta consistente con los comportamientos esperados. (Gómez Valentín, 2007)

2.2.6.1. Pérdidas por almacenamiento en depresiones

Evaluar las pérdidas debido al almacenamiento en depresiones representa un desafío. En algunas cuencas experimentales, se han recopilado datos de campo que relacionan estas pérdidas con la pendiente promedio de la cuenca. Como aproximación general, se puede mencionar que estas pérdidas oscilan en el rango de unos pocos milímetros de precipitación, alrededor de 2 a 4 mm, y tienden a aumentar en terrenos planos con pendientes mínimas, lo cual es coherente con las expectativas. (Gómez Valentín, 2007)

Se han planteado correlaciones basadas en la pendiente de la cuenca, adoptando un enfoque del tipo:

$$d_p = 0.7696 I^{-0.49}$$

Donde d_p representa la pérdida por almacenamiento en depresiones del terreno, medida en milímetros, y la pendiente media de la cuenca (I) se expresa como un porcentaje (Manual de SWMM).

Tabla 1

Pérdidas por almacenamiento en depresiones (valores en mm)

Tipo de terreno	Retención total	Valor recomendado
Impermeable:		
Viales y áreas pavimentadas	1.3 a 3.8	2.5
Tejados planos	2.5 a 7.5	2.5
Tejados inclinados	1.3 a 2.5	1.2
Permeable:		
Césped	5 a 12.5	8-9
Áreas de arbolado	5 a 15.2	10

Fuente: (Gómez Valentín, 2007)

2.2.6.2. Pérdidas por infiltración:

El comportamiento del suelo en su capa superficial bajo condiciones de no saturación presenta una dinámica compleja que ha sido objeto de numerosos estudios especializados. La heterogeneidad espacial en el potencial de infiltración del suelo agrega dificultades, ya que los datos de campo se basan en pruebas en áreas reducidas, y estos experimentos a menudo muestran resultados dispersos. En muchas cuencas experimentales, solo se mide la precipitación en un solo punto y el caudal de salida, lo que impide registrar directamente el proceso de pérdidas. La infiltración del agua en el suelo está condicionada

por diversos factores, como el tipo de suelo, el uso de la tierra, la pendiente, la humedad previa del suelo y la porosidad. (Gómez Valentín, 2007)

Los métodos de estimación de pérdidas más habituales son:

2.2.6.2.1. Pérdidas lineales

En superficies donde la tasa de infiltración se mantiene constante durante la lluvia, se utiliza un modelo hidrológico simple que asume una infiltración constante a lo largo del tiempo. Este enfoque se conoce como el método del "índice ϕ " y se usa comúnmente en hidrología urbana. Se basa en un solo parámetro, la tasa de infiltración de la cuenca, y ciertos casos se extiende a un enfoque de dos parámetros al incorporar un límite inicial de escorrentía en milímetros. En cuencas de zonas urbanas, donde la variabilidad del suelo es limitada y la humedad del suelo tiene poco efecto, este enfoque es adecuado. También es aplicable en suelos muy impermeables y durante eventos de lluvia breve donde el cambio de la tasa de infiltración se considera insignificante. (Gómez Valentín, 2007)

2.2.6.2.2. Método del número de curva (CN) del SCS

El método del índice de curva, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los EE. UU., es ampliamente utilizado, en gran parte debido a la extensa información de campo presente en la literatura. La retención máxima de agua, expresada en milímetros, se calcula de acuerdo con este método.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Entonces, los suelos con alta permeabilidad, que presentan una capacidad de retención casi ilimitada, tendrían un número de curva de 0, mientras que los suelos con impermeabilidad total y capacidad de infiltración nula recibirían un número de curva de 100.

Luego, el número de curva (CN) tiene en cuenta tres condiciones de humedad previas, denominadas Condiciones Antecedentes de Humedad: secas (Tipo I), normales (Tipo II) y húmedas (Tipo III). Estas se determinan en base a la cantidad de lluvia acumulada en los cinco días anteriores y la estación del año.

Tabla 2

Condiciones antecedentes de humedad en función de la precipitación

Condiciones antecedentes de humedad	Precipitación durante los cinco días previos	
	Periodo seco	Periodo húmedo
Tipo I	Menor que 12.5	Menor que 35.5
Tipo II	Entre 12.5 y 28.0	Entre 35.5 y 53.0
Tipo III	Mayor que 28.0	Mayor que 53.0

Fuente: Soil Conservation Service (1972)

Los valores del número de curva (CN) se han registrado según el tipo de suelo y la utilización del terreno. Los suelos son categorizados en cuatro grupos hidrológicos.

Tabla 3

Grupo hidrológico de suelo según el SCS (USDA)

Grupo Hidrológico del suelo	Textura	Drenaje
A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.	Excesivo
B	Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.	Bueno a moderado
C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.	Imperfecto
D	Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.	Pobre o muy pobre

Fuente: (Chow et al., 1994)

A partir de las tablas previas tenemos:

Tabla 4

Números de Curva para cada tipo de uso de la tierra en condiciones antecedentes de humedad de tipo II

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastos y prados				
En malas condiciones	68	79	86	89
En buenas condiciones	39	61	74	80
Pradera				
En buenas condiciones	30	58	71	78
Terreno boscoso				
Poco denso, cubierta forestal pobre o inexistente	45	66	77	83
Buena cubierta forestal	25	55	70	77
Espacios abiertos (césped, parques, campos, etc.)				
En buenas condiciones (75% o más de hierba)	39	61	74	80
En pobres condiciones (50-75% de hierba)	49	69	79	84
Zonas comerciales (85% impermeable)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeable)	81	88	91	93
Zona residencial				
Tamaño medio de la parcela (% Impermeabilidad)				
< 500 m ² (65%)	77	85	90	92
1000 m ² (38%)	61	75	83	87
1500 m ² (30%)	57	72	81	86
2000 m ² (25%)	54	70	80	85
4000 m ² (20%)	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Fuente: Soil Conservation Service (1986)

En la tabla 7 se encuentran los valores del número de curva (CN) correspondientes a condiciones normales (Tipo II) para diversos tipos de uso del suelo. A partir del CN en condiciones normales (Tipo II), es posible calcular el CN para condiciones secas (Tipo I) o húmedas (Tipo III) mediante las siguientes ecuaciones:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

2.2.7. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

En áreas urbanas, el tiempo de concentración hidrológica, que representa el lapso que tarda una gota de agua en desplazarse desde el punto más distante de la cuenca hasta su salida, continúa siendo un parámetro de importancia. Sin embargo, en áreas urbanas, el agua sigue dos rutas: una superficial, pasando por estructuras de captación antes de entrar en la red de drenaje, y otra a través de esta red. Estas rutas difieren en textura y definición. La superficie urbana es bidimensional y rugosa, mientras que la red de drenaje tiene una estructura clara y conductos lisos, lo que afecta el flujo del agua en cada camino. (Gómez Valentín, 2007)

$$T_C = T_{entrada} + T_{viaje}$$

Entonces, el tiempo de entrada es el lapso que transcurre hasta que el agua es dirigida hacia la red de drenaje, pudiendo tomar diferentes trayectorias y superficies en su camino.

Además, el tiempo de viaje es el periodo que lleva al agua fluir dentro de la red. En una primera aproximación, se puede determinar dividiendo la distancia recorrida entre la velocidad del agua.

$$T_{viaje} = \sum \frac{L_i}{V_i}$$

Tabla 5

Fórmulas para el cálculo del tiempo de concentración

Método y fecha	Fórmula para T _c (minutos)
	$T_c = 0.01947L^{0.77}S^{-0.385}$
Kirpich (1940)	L: Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (m) S: Pendiente promedio de la cuenca (m/m)
California Culverts Practice (1942)	$T_c = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$ L: Longitud del curso de agua más largo (m) H: Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m)
Izzard (1946)	$T_c = \frac{525(0.0000276i + c)L^{0.33}}{S^{0.33}i^{0.667}}$ i: Intensidad de lluvia (mm/h) c: Coeficiente de retardo L: Longitud de la trayectoria del flujo (m) S: Pendiente de la trayectoria del flujo (m/m)
Federal Aviation Administration (1970)	$T_c = 0.7035 \frac{(1.1 - C)L^{0.50}}{S^{0.33}}$ C: Coeficiente de escorrentía del método racional L: Longitud del flujo superficial (m) S: Pendiente de la superficie (m/m)
Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley (1965)	$T_c = \frac{7L^{0.60}n^{0.6}}{I^{0.4}S^{0.3}}$ L: Longitud del flujo superficial (m) n: Coeficiente de rugosidad de Manning I: Intensidad de lluvia (mm/h) S: Pendiente promedio del terreno (m/m)
Ecuación de retardo SCS (1973)	$T_c = \frac{0.0136L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{S^{0.5}}$ L: Longitud hidráulica de la cuenca mayor trayectoria de flujo (m) CN: Número de curva SCS I: Intensidad de lluvia (mm/h) S: Pendiente promedio de la cuenca (m/m)

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2012)

2.2.8. MÉTODO RACIONAL

El método racional permite estimar el caudal máximo de escorrentía Q para una cuenca determinada, teniendo en cuenta un período de retorno específico, utilizando una fórmula expresada en unidades coherentes.

$$Q = CIA$$

La determinación del flujo pico (Q) en un lugar específico se fundamenta en la consideración de tres elementos: un factor empírico de escorrentía (C) que contabiliza las pérdidas de agua de lluvia, la magnitud de la precipitación (I) vinculada a un lapso de recurrencia particular, y la extensión superficial (A) de la zona que vierte sus aguas en dicho punto. (Gómez Valentín, 2007).

Figura 8

Hipótesis del método racional

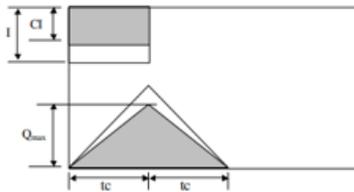


Figura 9-a

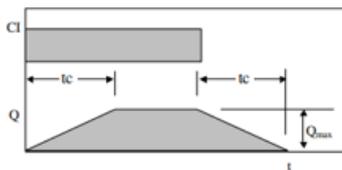


Figura 9-b

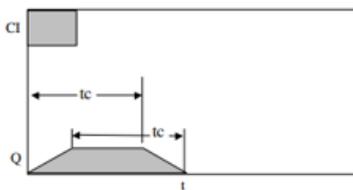


Figura 9-c

Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

Las premisas esenciales del método racional, que se ilustran en la figura 9, según Gómez Valentín (2007) son las siguientes:

- Se asume que la magnitud de la lluvia es uniforme sobre la superficie y no presenta variaciones temporales.
- El lapso de precipitación que produce el flujo pico, dada una intensidad I , se equipara al tiempo de concentración (t_c), lo que resulta en un diagrama de intensidad-duración rectangular con una altura acumulada de I multiplicado por t_c .
- El tiempo de concentración se refiere al intervalo necesario para que la totalidad de la zona de drenaje aporte escorrentía en la sección de salida, momento en el cual se alcanza el caudal máximo. El período entre el final de la lluvia y el cese del flujo superficial es igual al tiempo de concentración. Esto implica considerar un hidrograma con una duración igual al doble de dicho tiempo (ver figura 9-a). Es crucial notar que, si la lluvia persiste por un periodo mayor que el tiempo de concentración, el caudal máximo se estabiliza hasta que la precipitación termina (ver figura 9-b). Inversamente, si la lluvia es de menor duración que el tiempo de concentración para la misma intensidad, el caudal máximo será inferior, ya que no se logra la contribución simultánea de toda la cuenca (ver figura 9-c).

El método racional se ajusta mediante el uso de coeficientes empíricos para corregir ciertos grados de desviación.

2.2.8.1. Método racional para cuenca menores a 10 Km²

$$Q = 0.278 CIA$$

Donde:

Q: Es el flujo máximo (m³/s)

A: Superficie (Km²)

Tabla 6

Coeficientes de escorrentía método racional

COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELO	PENDIENTE DEL TERRENO				
		PRONUNCIADA >50%	ALTA >20%	MEDIA >5%	SUAVE >1%	DESPRECIABLE <1%
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
Pastos, vegetación ligera	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
Hierba, grama	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Bosques, densa vegetación	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2012)

2.2.8.2. Método Racional Modificado

Esta metodología se basa en el método racional, específicamente en la formulación propuesta por Témez (1987, 1991) y ajustada para las particularidades climáticas de España. Esta adaptación facilita la estimación simple de los caudales máximos en cuencas hidrográficas naturales con extensiones inferiores a 770 kilómetros cuadrados y tiempos de concentración (T_c) que oscilan entre 0.25 y 24 horas. La ecuación empleada es la siguiente:

$$Q = 0.278 CIAK$$

Donde:

Q: Caudal máximo (m^3/s)

C: Coeficiente de escorrentía.

I: Intensidad (mm/h)

A: Superficie de la cuenca (Km^2)

K: Factor de Uniformidad

A continuación, se presentan las ecuaciones que definen:

Tiempo de concentración (T_c)

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Donde:

L: Dimensión del flujo principal (Km)

S: Inclinación media del flujo principal (m/m)

Coeficiente de uniformidad (K)

$$K = 1 + \frac{T_c^{1.25}}{T_c^{1.25} + 14}$$

Unidades:

T_c : horas

Coeficiente de simultaneidad (K_A)

$$K_A = 1 - (\log_{10} A/15)$$

Donde:

A: Área de la cuenca (Km^2)

Precipitación máxima corregida sobre la cuenca (P)

$$P = K_A P_d$$

Donde:

P_d : Precipitación máxima diaria (mm)

Intensidad de Precipitación (I)

$$I = \left(\frac{P}{24}\right) (11)^{\frac{28^{0.1} - T_c^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

Donde:

P: Precipitación máxima corregida (mm)

Coefficiente de escorrentía (C)

$$C = \frac{(P_d - P_o)(P_d + 23P_o)}{(P_d + 11P_o)^2}$$

Donde:

P_o : Umbral de escorrentía = $\left(\frac{5000}{CN}\right) - 50$

CN: Número de curva

2.2.9. HIDRÁULICA Y DRENAJE URBANO

2.2.9.1. Proceso de urbanización

La migración de habitantes desde el campo hacia los centros urbanos constituye un fenómeno extensamente documentado. En estos días, existe un valor cercano al 49% de los habitantes globales que reside en ciudades, con un crecimiento superior al 80 % en los últimos veinte años. En el caso de España, entre 1920 y 1981, los habitantes de las capitales provinciales se incrementaron 4.5 veces, y para el año 2007, más del 75 % de los ciudadanos vivía en entornos urbanos. (Gómez Valentín, 2007)

La ciudad de Cajamarca, capital de la región homónima, situada en el norte de Perú a 2750 msnm, tenía una población de 218,741 habitantes según el CENSO de 2017. Su tasa de crecimiento urbano es del 1.99%, mientras que la tasa de crecimiento rural es de -0.65% en comparación con el CENSO de 2007. Estos datos reflejan una tendencia mundial de disminución de la población rural y un rápido aumento de la población urbana.

2.2.9.2. Impactos de la infraestructura urbana.

El proceso de urbanización dentro de una cuenca hidrográfica transforma su comportamiento hidrológico ante un evento de precipitación determinado. Este proceso implica la modificación de los sistemas naturales de drenaje, mediante la construcción de conductos y canales que aceleran el flujo de agua hacia las partes más bajas de la cuenca, junto con un aumento en las áreas impermeables, todo con el objetivo de drenar el área urbanizada de la manera más eficiente y rápida posible. Esta transformación afecta la hidrología de la cuenca, particularmente en las zonas ubicadas en la parte inferior. El desarrollo urbano en las áreas superiores de la cuenca modifica el comportamiento del hidrograma aguas abajo, incrementando tanto la cantidad de escorrentía como el caudal pico. Adicionalmente, se observa una disminución en el lapso entre el comienzo de la escorrentía pluvial y la ocurrencia del caudal máximo, lo que se traduce en una reducción

del tiempo de concentración. Como consecuencia, las áreas situadas aguas abajo experimentan con mayor frecuencia caudales susceptibles de generar inundaciones, siendo estos problemas más graves en terrenos con pendientes suaves. (Gómez Valentín, 2007)

2.2.9.3. Influencia del desarrollo urbano en el proceso de escorrentía

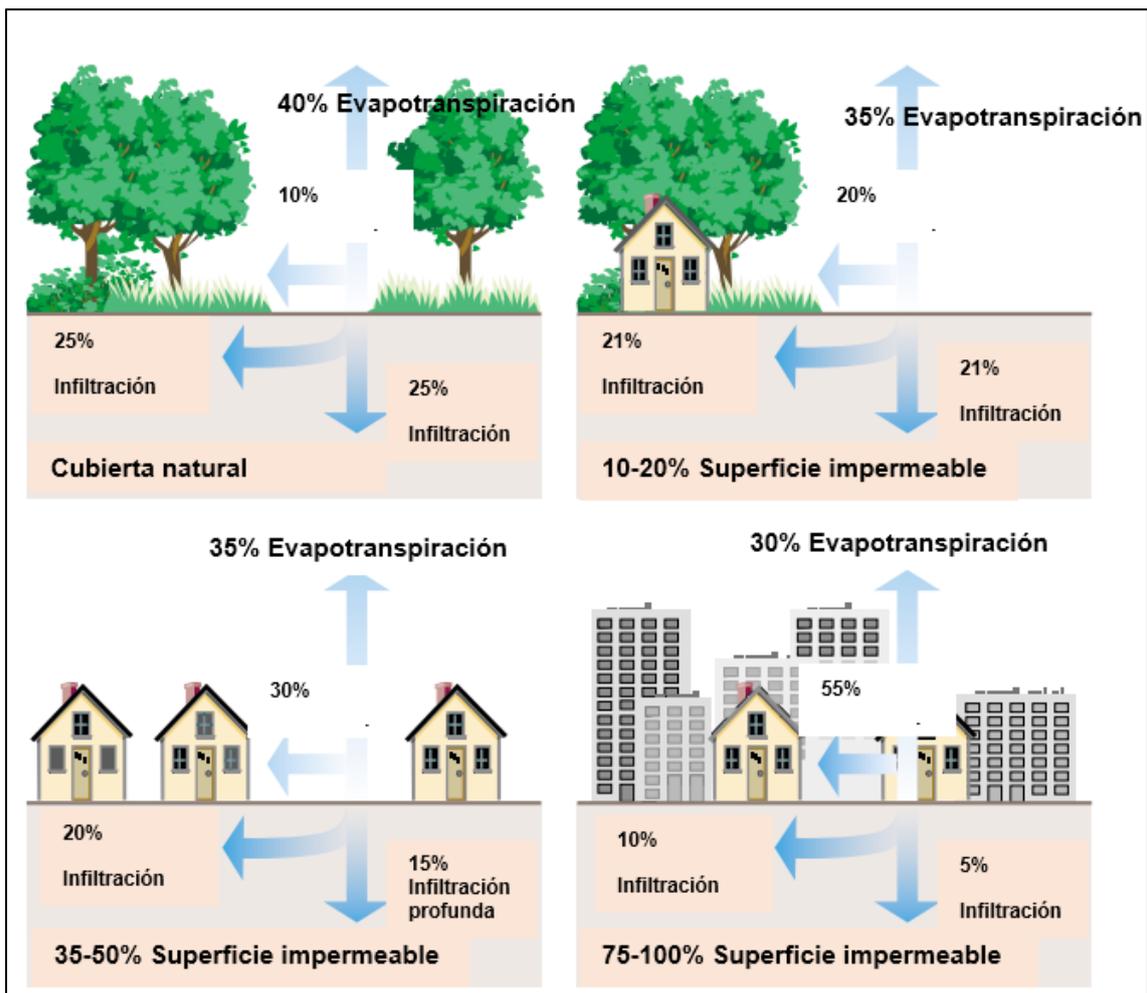
Los cambios en el patrón de escorrentía son uno de los impactos más notables de la urbanización. La urbanización afecta la escorrentía superficial de tres maneras: (a) los volúmenes de escorrentía aumentan debido a la reducción de la infiltración de agua de lluvia y la evapotranspiración, (b) aumentando la velocidad de la escorrentía mediante mejoras en los canales de drenaje y (c) reduciendo el tiempo de respuesta de la cuenca, lo que provoca un aumento en la intensidad máxima de lluvia que genera el caudal máximo. En resumen, la urbanización altera el ciclo hidrológico de la cuenca. La literatura ha cuantificado estos cambios, observando que el caudal medio anual aumenta de 1.8 a 8 veces y el caudal de retorno de 100 años aumenta de 1.8 a 3.8 veces debido a la urbanización. El volumen de escorrentía directa de aguas pluviales se incrementa hasta 6 veces para varios períodos de retorno. La magnitud de estos aumentos varía según la frecuencia de las tormentas, el clima local y las condiciones fisiográficas de la cuenca, como el tipo de suelo y el grado de impermeabilidad. (Marsalek et al., 2007)

Adicionalmente, el modelo de crecimiento urbano predominante, que se caracteriza por una extensa impermeabilización de los suelos, causa una profunda alteración en el ciclo hidrológico natural en las urbes. Esto tiene efectos significativos tanto para el incremento de la fragilidad de las comunidades urbanas como para la integridad de los ecosistemas acuáticos. La impermeabilización intensiva del suelo reduce drásticamente su capacidad para absorber la lluvia, lo que resulta en una mayor cantidad de agua de lluvia que se convierte en escorrentía superficial. Esta escorrentía se acumula rápidamente, generando

caudales punta elevados. Además, las superficies urbanas lavadas arrastran una gran cantidad de contaminantes hacia la escorrentía, lo que provoca impactos significativos en los cuerpos receptores de agua. (Soriano Martínez, 2015)

Figura 9

Grado de impermeabilización de acuerdo con el proceso de urbanización



Nota. Adaptado de Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices, por Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998.

Según lo mostrado en la Figura 10, según el Grupo de Trabajo Federal Interinstitucional para la Restauración de Corrientes de EE. UU., la cantidad de escorrentía está directamente relacionada con el grado de impermeabilización del suelo. En entornos

naturales, solo alrededor del 10% de la lluvia se convierte en flujo superficial. Sin embargo, este porcentaje aumenta a medida que el grado de impermeabilización del suelo aumenta: al 20% en entornos rurales (donde la impermeabilización varía entre el 10% y el 20%), al 30% en entornos suburbanos (donde la impermeabilización oscila entre el 35% y el 50%), y llega al 55% en áreas urbanas altamente impermeabilizadas.

Asimismo, la impermeabilización derivada del modelo urbano actual acelera la conversión de lluvia en escorrentía, reduciendo el tiempo de respuesta y elevando tanto el volumen total como el caudal máximo ante eventos de lluvia similares.

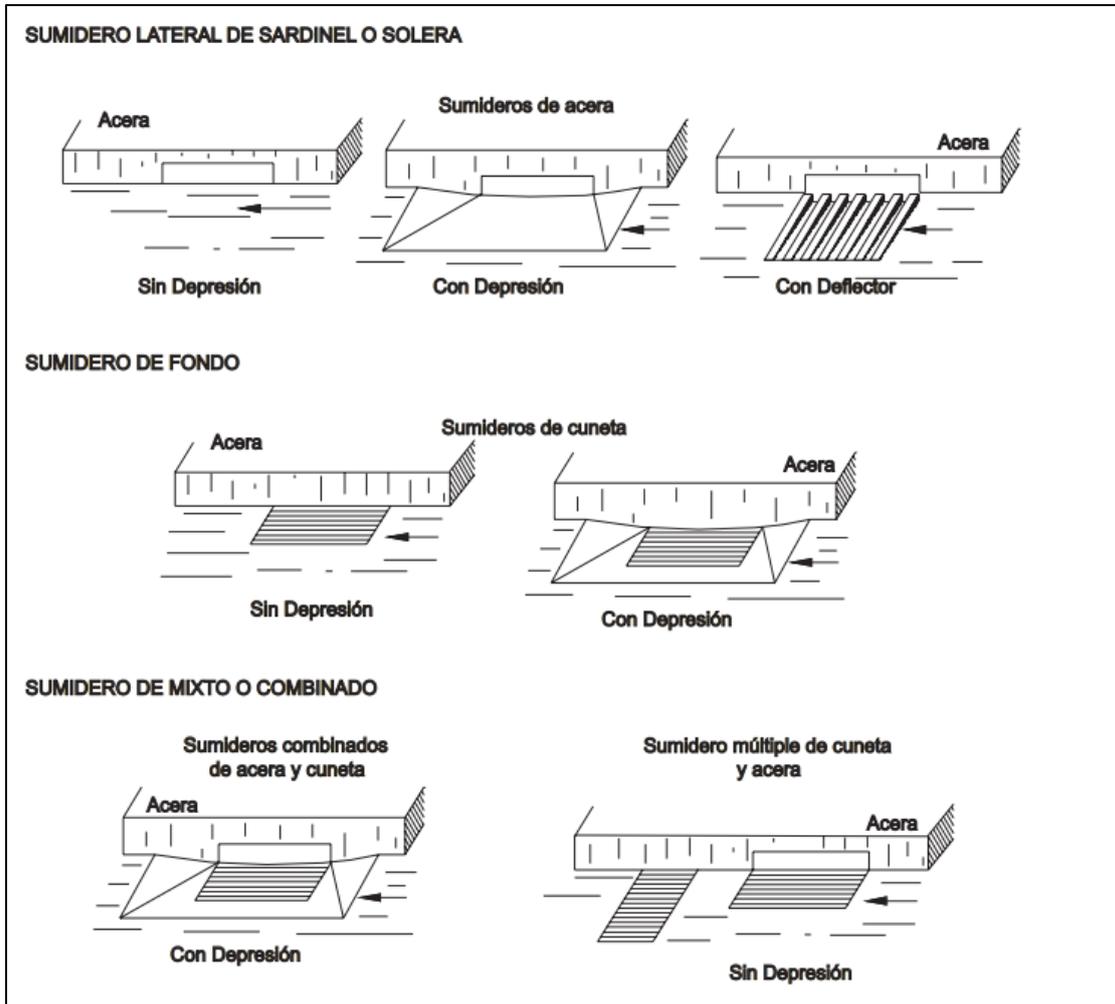
2.2.10. COMPONENTES DE DRENAJE PLUVIAL URBANO

2.2.10.1. Estructuras de captación

Se recolectan las aguas para su transporte utilizando estructuras de captación en los sistemas de alcantarillado pluvial. Estas estructuras, como los sumideros, se colocan estratégicamente en áreas bajas de las calles. Los sumideros están equipados con rejillas para evitar que objetos obstruyan los conductos, por lo que a menudo se les conoce como coladeras pluviales. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021)

Figura 10

Tipos de sumidero



Nota. Tomado de Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021.

2.2.10.2. Estructuras de Conducción

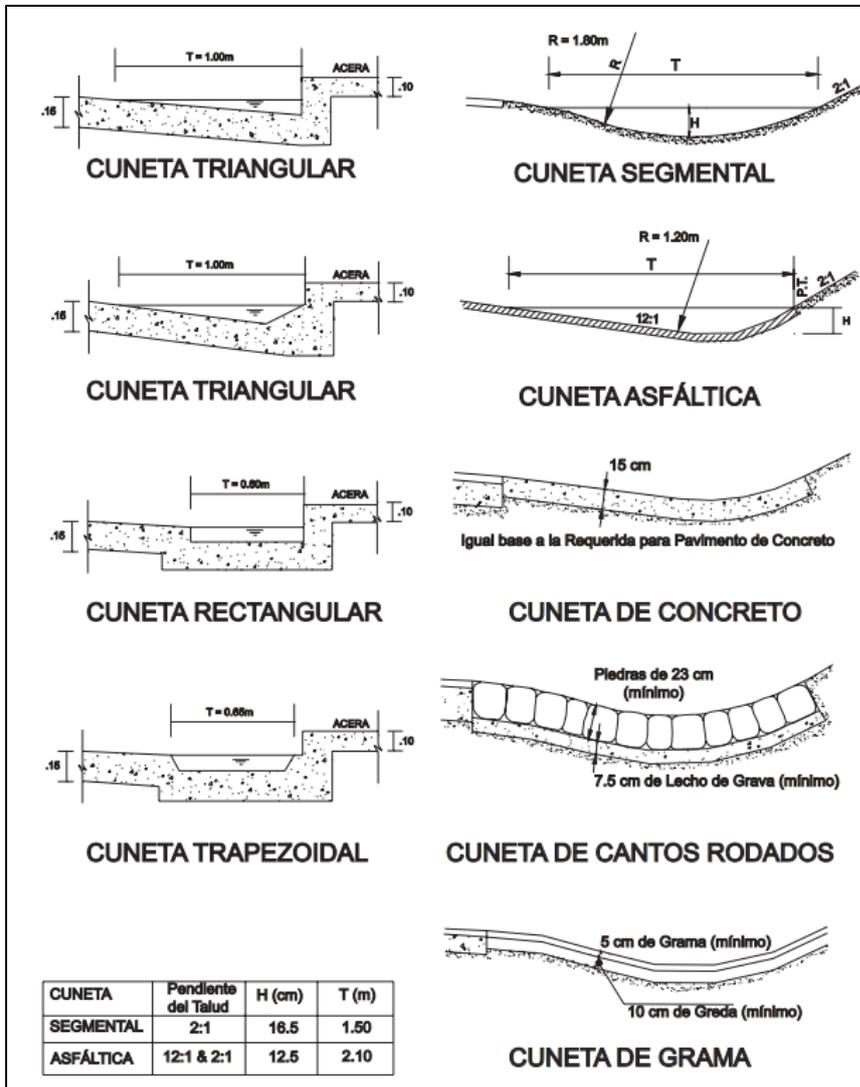
Estas estructuras tienen la función de trasladar el agua recolectada por las obras de captación hacia las infraestructuras de tratamiento o los puntos de descarga. Constituyen el elemento central de la red de alcantarillado y se componen de conductos cerrados y canales abiertos que transportan el flujo de agua. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021)

2.2.10.2.1. Cuneta:

El escurrimiento generado por la lluvia sobre veredas, calzadas y las descargas de los sistemas pluviales de edificaciones debe encauzarse hacia las cunetas. Estas cunetas conducen el escurrimiento superficial hacia zonas de menor cota, donde los sumideros captan el agua de lluvia para derivarla posteriormente al sistema de drenaje pluvial de la ciudad. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021)

Figura 11

Sección transversal de cunetas



Nota. Tomado de Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021.

2.2.10.2.2. Vereda y pista:

Según la Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021). Para gestionar el flujo pluvial que impacta las aceras y calles, así como la que proviene de edificaciones u otras estructuras, es necesario tener en cuenta:

Orientación de flujo: En el diseño de calzadas se establecen pendientes longitudinales (S_L) y transversales (S_T) para dirigir eficientemente el flujo de lluvia que cae sobre la superficie hacia los laterales de la pista o calzada.

Pendientes mínimas: Las inclinaciones mínimas necesarias para asegurar un buen drenaje en las áreas costeras, sierra y selva son:

Tabla 7

Pendientes mínimas para la calzada o pista

Regiones geográficas	Pendiente longitudinal	Pendiente transversal en la pista o calzada	Pendiente transversal en la berma
Costa	$S_L \geq 0.5 \%$	$S_T \geq 2 \%$	$S_T \geq 2.5 \%$
Sierra	$S_L \geq 0.5 \%$	$S_T \geq 2.5 \%$	$S_T \geq 3 \%$
Selva	$S_L \geq 0.5 \%$ (Selva baja)	$S_T \geq 3 \%$	$S_T \geq 3.5 \%$
	$S_L \geq 1 \%$ (Selva alta)		

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021)

La extensión superficial del agua de lluvia sobre la calzada debe ajustarse a las siguientes directrices:

- En calles principales con alto flujo vehicular: no debe exceder el ancho de la berma.
- En calles secundarias con bajo flujo vehicular: puede extenderse hasta la mitad del ancho de la calzada.

Tabla 8

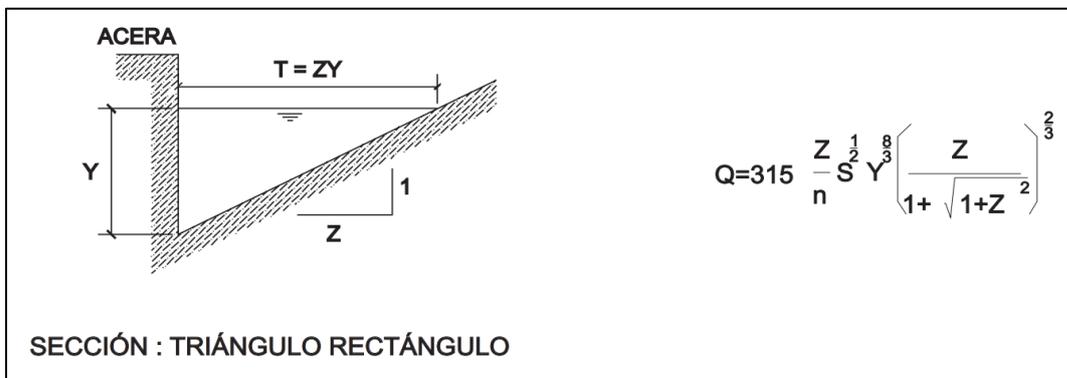
n de Manning para cunetas de calles y calzadas

Tipo de cuneta o calzada	n de Manning
Cuneta de concreto con acabado paleteado	0.012
Calzada de asfalto	
Textura suave (o lisa)	0.013
Textura rugosa	0.016
Cuneta de concreto-calzada de asfalto	
Suave (o liso)	0.013
Rugoso	0.015
Calzada de concreto	
Acabado	0.014
Acabado escobillado	0.016

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021)

Figura 12

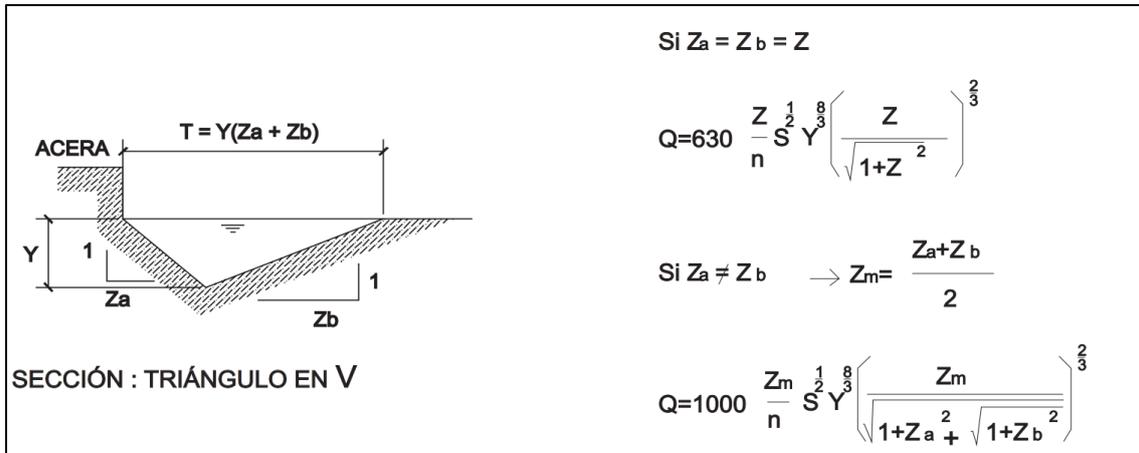
Ecuación de Manning en la determinación de caudales en cunetas triangulares



Nota. Tomado de Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021.

Figura 13

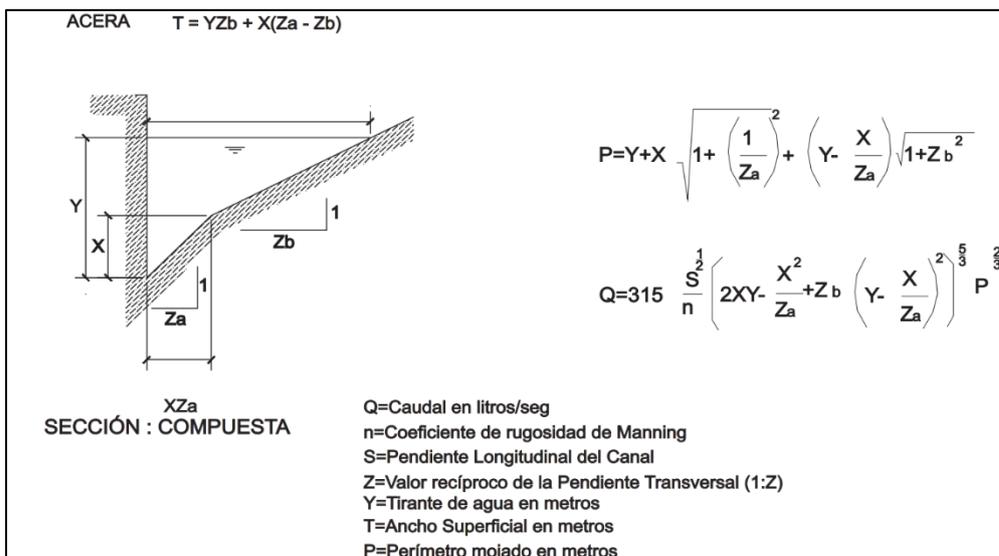
Ecuación de Manning en la determinación de caudales en cunetas triangulares



Nota. Tomado de Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021.

Figura 14

Ecuación de Manning en la determinación de caudales en cunetas triangulares



Nota. Tomado de Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano, por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021.

2.2.11. SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE:

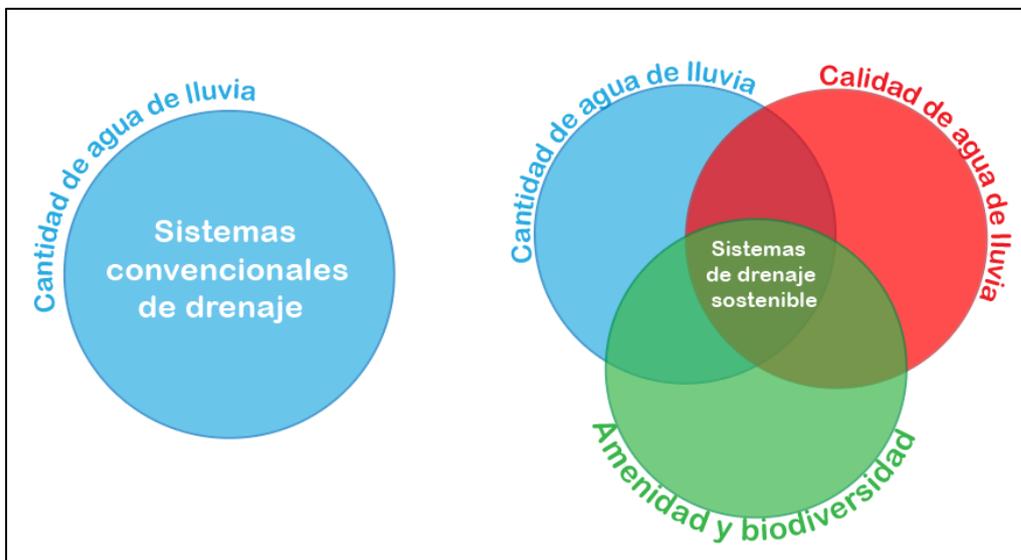
Una nueva visión para la planificación del drenaje urbano emergió a raíz del informe Brundtland, producido en 1987 por la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de la ONU. Esta visión aboga por la adopción de métodos que combinan la administración cuantitativa y cualitativa del agua con ventajas para la sociedad. Estas

técnicas, dirigidas a impulsar el desarrollo de urbes sostenibles a futuro, se denominan Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS). (Soriano Martínez, 2015)

De igual manera, los Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS) buscan minimizar la influencia del desarrollo urbano en el volumen y la pureza del agua de lluvia, al tiempo que promueven espacios recreativos y fomentan la biodiversidad. Esta aproximación plantea una transformación fundamental en la gestión del agua pluvial, concibiéndola no como un inconveniente, sino como un recurso potencial. La ilustración que sigue presenta, de manera simplificada, la distinción entre las filosofías de los sistemas de drenaje convencionales y los SUDS.

Figura 15

Comparación de objetivos entre los sistemas convencionales de drenaje y los Sistemas de Drenaje Sostenible.



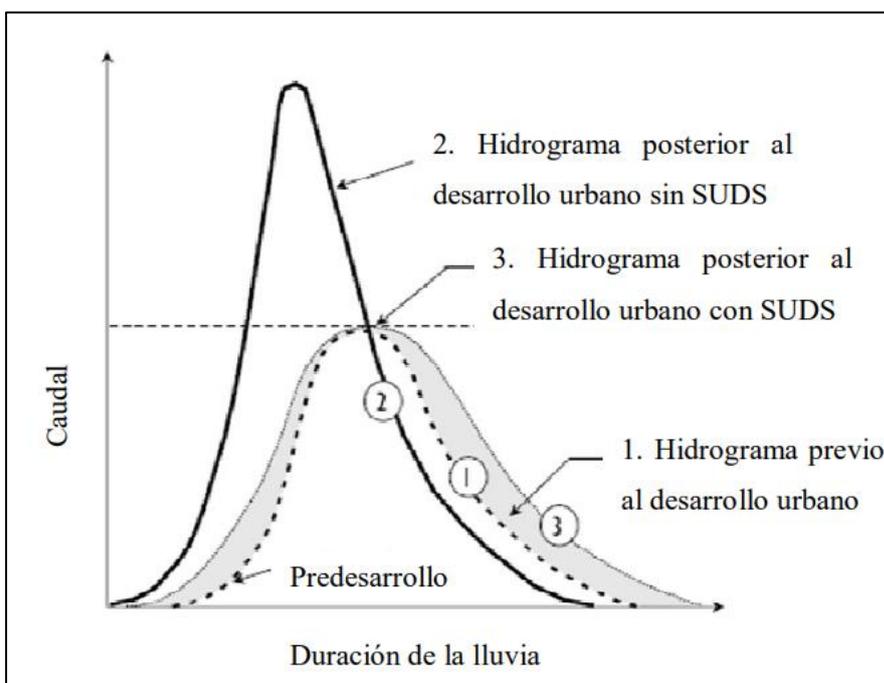
Nota. Tomado de Indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos: Aplicación a la ciudad de Zaragoza, por Soriano Martínez, 2015.

Por ende, los Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS) difieren significativamente del enfoque tradicional. En el método tradicional, la escorrentía se evacua rápidamente desde su punto de origen para su vertido o, en el mejor escenario, para su tratamiento. Por otro

lado, los SUDS buscan retener y reducir en origen tanto los picos de caudal como la contaminación vinculada a estos eventos. La preferencia por sistemas naturales como suelos, vegetación y estanques, siempre que sea viable, es la base de la descentralización en el control y tratamiento de las aguas pluviales. Esto evita la sobrecarga de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales, a la vez que promueve la recarga de acuíferos y la preservación y restauración de los ecosistemas urbanos. Adicionalmente, la atenuación y reducción de los caudales máximos contribuye a minimizar el riesgo de inundaciones en las áreas urbanas y protege los cauces fluviales contra la erosión. Este enfoque también integra nuevos recursos al ciclo integral del agua al aprovechar el agua de lluvia. (Soriano Martínez, 2015)

Figura 16

Respuesta hidrológica de una cuenca según grado de desarrollo urbano.



Nota. Tomado de Indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos: Aplicación a la ciudad de Zaragoza, por Soriano Martínez, 2015.

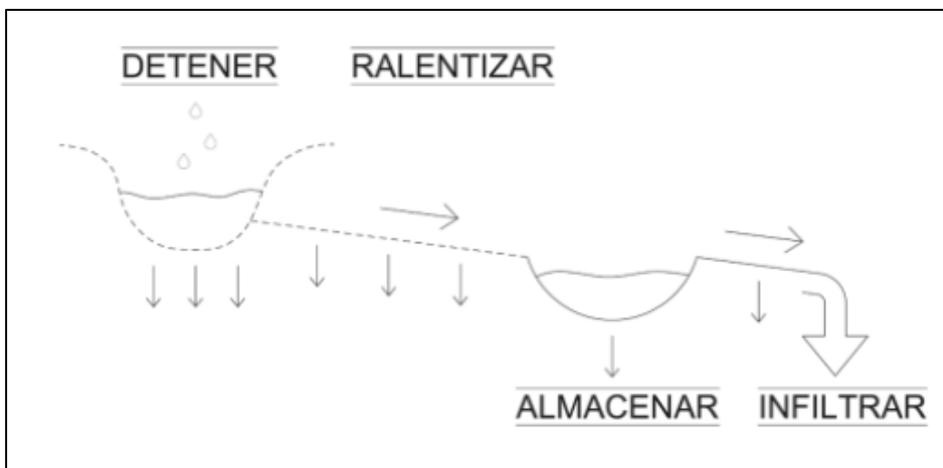
La Figura ilustra tres hidrogramas, el hidrograma 3 que representa el hidrograma de la cuenca después de la urbanización y la implementación de medidas de control de caudales máximos e inundaciones. Aunque el caudal máximo puede ser similar al que existía antes del desarrollo urbano, se observa un aumento en el caudal y la duración de las lluvias intensas, como se indica en el área sombreada, debido a la urbanización de la cuenca. La diferencia más notable es con el hidrograma 2, el cual es posterior a la urbanización, pero sin SUDS. (Soriano Martínez, 2015)

2.2.11.1. Estrategias para la implementación de SUDS

Los sistemas tradicionales de gestión del agua de lluvia suelen llevar el agua directamente desde las superficies pavimentadas hasta las depuradoras sin permitir su infiltración ni contemplar su reutilización. Esto causa problemas durante lluvias intensas, con canalizaciones colapsando y depuradoras sobrecargadas. En contraste, los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) buscan mitigar el riesgo de inundaciones mediante la retención, desaceleración y almacenamiento del agua de lluvia en el sitio donde se origina. Además, los SUDS mejoran la calidad del agua y permiten su reutilización para riego y otros usos, contribuyendo a la mejora del entorno urbano. Los SUDS actúan a lo largo de todo el recorrido del agua de lluvia, desde el momento en que esta toca la superficie hasta su vertido en la red de saneamiento o su infiltración en el suelo. Este recorrido también es conocido como cadena de gestión y considera el ciclo del agua en su totalidad. Inicialmente, se prioriza la retención del agua en su punto de origen, luego disminuir la velocidad del flujo a través del área urbanizada para reducir la escorrentía. Posteriormente, se almacena el exceso de agua y, por último, se infiltra en el suelo o se reutiliza para otros fines, como el riego o el baldeo, contribuyendo también a mejoras paisajísticas y medioambientales en el entorno urbano. (Ministerio para la transición ecológica, 2019)

Figura 17

Esquemas del funcionamiento de la cadena de gestión del agua.



Nota. Tomado de Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible Ministerio para la transición ecológica, 2019.

2.2.12. *NORMATIVA PERUANA SOBRE SUDS*

En el Perú, no existe una norma técnica exclusiva y específica para los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Sin embargo, los SUDS son abordados de manera indirecta en varias normativas y guías técnicas relacionadas con la gestión del agua, infraestructura verde y desarrollo urbano sostenible.

Algunas normativas peruanas que incluyen aspectos relacionados con los SUDS son:

- Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE): Incluye disposiciones relacionadas con la gestión de aguas pluviales y diseño de infraestructura urbana.
- Ley de Recursos Hídricos (Ley N°29338): Establece principios generales para la gestión integrada del agua, lo que podría incluir la incorporación de soluciones basadas en la naturaleza y medidas sostenibles como los SUDS.
- Normas del Ministerio del Ambiente (MINAM): Aunque no son específicamente sobre SUDS, promueven el uso de infraestructura verde y prácticas sostenibles para la gestión de aguas pluviales y la resiliencia urbana.

Por lo tanto, es posible que el concepto de SUDS esté ganando relevancia en el país, pero de forma fragmentada en las normativas existentes. Para un enfoque más específico, muchas veces se recurren a normativas internacionales y guías técnicas para complementar el marco regulatorio nacional.

2.2.13. VOLUMEN DE TRATAMIENTO PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE AGUA (Vc)

Las soluciones SUDS enfocadas en mejorar la calidad del agua tienen como objetivo principal disminuir de manera significativa las cargas contaminantes arrastradas anualmente por la escorrentía pluvial. Para lograrlo, se centra en capturar y tratar el agua de lluvias frecuentes, responsables del fenómeno de primer lavado y del mayor deterioro de la calidad de los cuerpos receptores. Si un SUDS se diseña para manejar tormentas más intensas, el tamaño y costo del sistema aumentan considerablemente, pero el número de tormentas adicionales tratadas disminuye. Por ello, es crucial definir el volumen de tratamiento (Vc) basado en la lámina de escorrentía (hwqcv) para encontrar un equilibrio costo-eficiente entre la cantidad de tormentas tratadas, la eliminación de sólidos y los costos asociados tanto a la construcción como a la operación del sistema. (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016)

2.2.13.1. Determinación de la profundidad de lluvia (hp)

Se puede calcular el hwqcv indirectamente a partir de la profundidad de lluvia (hp). Una aproximación utilizada corresponde a estimar hp como la profundidad de lluvia diaria, entre 10 a 15 mm de lluvia efectiva, lo que equivale a una profundidad total de lluvia de aproximadamente 12,5 a 17,5 mm, al asumir pérdidas iniciales de 2,5 mm debido al humedecimiento del suelo y al almacenamiento en depresiones. (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016)

2.2.13.2. Determinación del factor de escorrentía K

Una de las formas de estimar K es:

$$K = 0.05 + 0.9I$$

Donde: K = factor de escorrentía I = Fracción impermeable efectiva del área tributaria.

2.2.13.3. Determinación de hwqcv a partir de la profundidad de lluvia (hp)

En ciertos casos, hwqcv se puede calcular de manera indirecta, mediante la siguiente ecuación

$$hwqcv = Khp$$

Donde: K = factor de escorrentía y hp = profundidad de lluvia (mm)

2.2.13.4. Determinación de Vc

Las estructuras SUDS generalmente se instalan en áreas de drenaje de tamaño reducido. Considerando que en este tipo de áreas es aconsejable utilizar el método racional para estimar los caudales de escorrentía, resulta adecuado aplicar un principio similar para calcular el volumen de escorrentía. Así, dado que los coeficientes de escorrentía (C) y los coeficientes de ajuste (K) son compatibles, el volumen de calidad puede determinarse directamente mediante una fórmula que incorpora la profundidad de lluvia:

$$V_c = Ch_pA$$

Donde: Vc = Volumen de calidad (m3), C = Coeficiente de escorrentía del terreno, A=Área de drenaje (m2)

2.2.14. TIPOS DE SUDS

2.2.14.1. Jardines Filtrantes

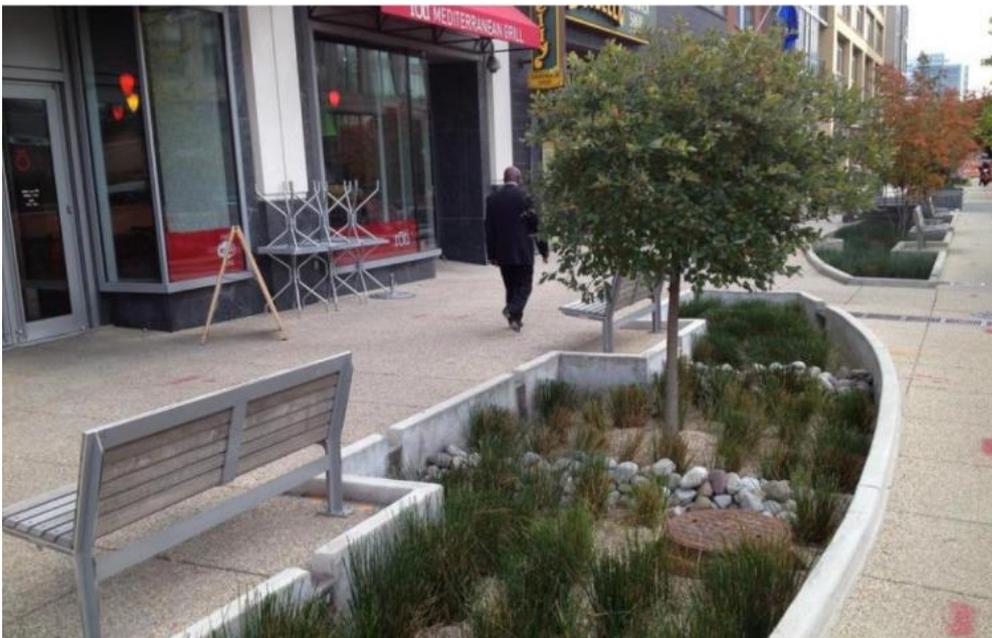
Es un método de construcción cuyo propósito es mejorar la calidad del agua originada por las lluvias, haciendo uso de elementos naturales como vegetación y filtros compuestos

por arena y grava, diseñados para capturar los contaminantes transportados por la escorrentía. Esta técnica es versátil en términos de construcción y diseño, y contribuye a interceptar la lluvia, reduciendo tanto el volumen como la contaminación de la escorrentía (Trapote & Fernández, 2016).

Distintamente de otros sistemas SUDS, en esta tipología la vegetación desempeña un papel fundamental en su funcionamiento. Por ello, es necesario implementar un conjunto de tareas específicas destinadas exclusivamente al cuidado y mantenimiento de la cobertura vegetal. (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016)

Figura 18

Jardines filtrantes



Nota. Tomado de Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C., por Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016.

Sin embargo, Aunque la vegetación es el elemento principal para asegurar el correcto funcionamiento de esta tipología, también es esencial considerar otros componentes para

garantizar su desempeño óptimo. Inicialmente, dependiendo de la configuración del área, se puede incorporar un muro de retención que canalice el flujo de agua hacia un punto de entrada específico. De esta manera, se logra que el ingreso del agua ocurra a través de un dissipador de energía y siga un recorrido controlado, evitando así la erosión de distintas zonas del sistema. Luego, el agua fluye hacia el área de vegetación, donde comienza el proceso de infiltración en la capa orgánica. Bajo esta capa, se dispone de un suelo mejorado que proporciona soporte a las raíces, junto con una capa de grava destinada a almacenar un mayor flujo de agua. Para evacuar el agua que no logra infiltrarse, se instalan tuberías perforadas que conducen el excedente hacia el sistema de drenaje convencional. Además, en algunos casos, según las condiciones particulares del sitio, se implementan revestimientos impermeables en los laterales o en el fondo, con el fin de evitar infiltraciones no deseadas que puedan comprometer la estabilidad de estructuras cercanas.

2.2.14.1.1. Dimensionamiento

En primer lugar, se establece la profundidad de diseño (nivel de encharcamiento) de la estructura, la cual no debe superar los 30 cm para preservar las condiciones adecuadas para el crecimiento de la vegetación. Se recomienda instalar tuberías perforadas u otros sistemas de evacuación que aseguren el correcto funcionamiento de la estructura bajo esta profundidad, incluso durante eventos de lluvia que superen el evento de diseño. Dependiendo del tipo de vegetación utilizada, se puede permitir una mayor profundidad para aumentar la capacidad de tratamiento. Además, el fondo de la estructura debe ser plano para evitar la acumulación localizada de sedimentos. En los sistemas de bio-retención, los sedimentos se capturan principalmente en la capa de drenaje (la capa inferior de la estructura); si esta área es reducida, la estructura puede colmatarse rápidamente. Por ello, aumentar el área de fondo o de filtración disminuye el riesgo de

colmatación y reduce la necesidad de mantenimiento frecuente. La siguiente ecuación permite determinar el área mínima de fondo, asegurando que esta sea mayor que la del almacenamiento en la zona de filtro. Finalmente, el diseñador debe establecer el área superficial de la bio-retención (A_s), que debe ser igual o mayor al área de fondo (A_f).

Con estas dos variables y la profundidad de diseño (d), se determina el volumen total (V). Este volumen debe ser igual o superior al volumen de calidad (V_c) previamente estimado. En caso de que no se cumpla alguna de estas condiciones, será necesario ajustar las variables iniciales del diseño y repetir el proceso de cálculo hasta que se satisfagan todos los requisitos establecidos.

$$V = \frac{A_s + A_f}{2 \cdot d}$$

Donde: V = Volumen total (m^3), A_s = Área superficial de la estructura (m^2), A_f = Área de fondo de la estructura (m^2) y d = Profundidad de diseño (m)

2.2.14.1.2. Mezcla de suelo filtrante

Para las estructuras con infiltración nula o parcial, se aconseja una profundidad mínima de 45 cm. Esta capa es clave tanto para facilitar la infiltración del agua como para la retención de contaminantes, se recomienda la siguiente composición: Arena gruesa (50-60%), permite una buena infiltración y evita el encharcamiento. Materia orgánica (20-30%), compost o turba para mejorar la retención de nutrientes y favorecer el crecimiento vegetal. Limo/arcilla (10-20%), ayuda en la retención de contaminantes como metales pesados.

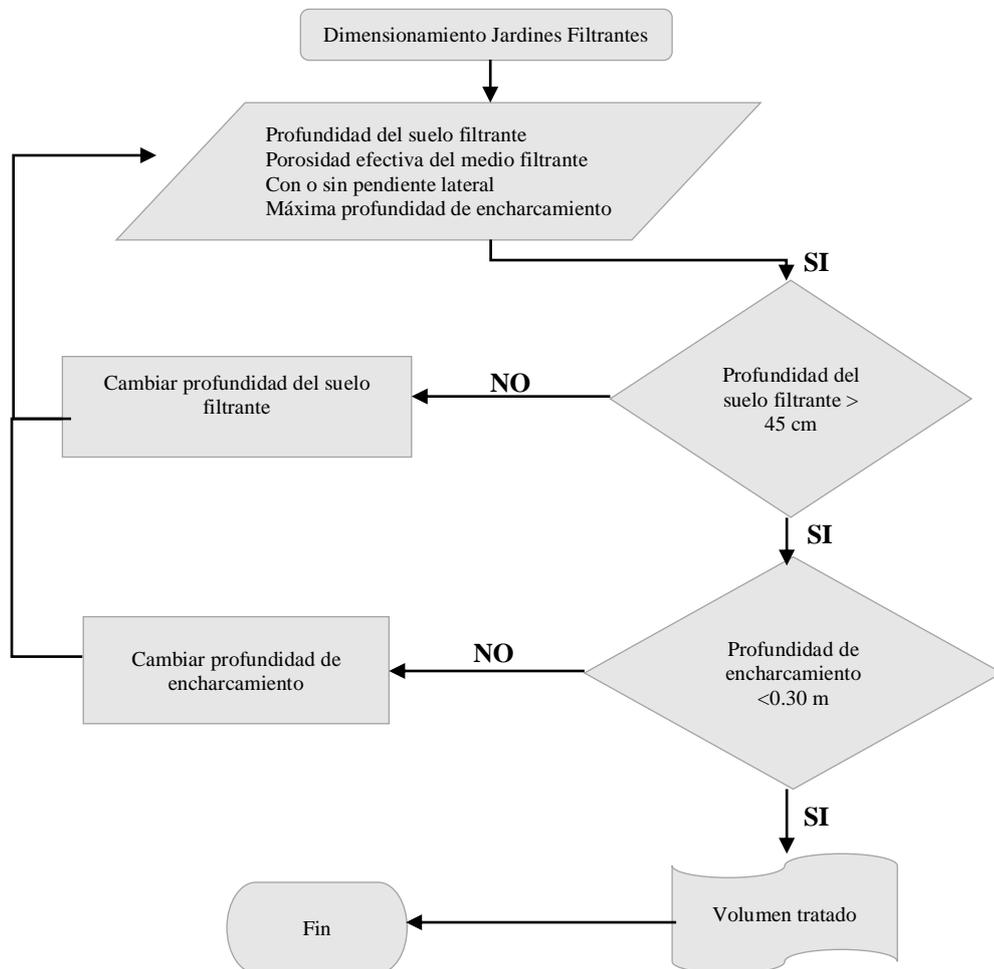
2.2.14.1.3. Sistema de drenaje

El uso de tuberías perforadas es necesario cuando la velocidad a la que el agua se filtra sea inferior a dos veces la tasa necesaria para drenar el volumen de diseño de calidad en

un plazo de 12 horas, o cuando sea necesario redirigir el agua tratada para evitar que afecte a las estructuras cercanas. También es necesario recurrir a tuberías perforadas cuando se utilicen geotextiles o membranas impermeables (infiltración nula). El diámetro mínimo recomendado para los orificios es de 3/8" (1 cm) para prevenir la obstrucción de las tuberías. Además, la separación máxima entre los centros de las tuberías no debe superar los 6 metros.

Figura 19

Diagrama de flujo del dimensionamiento de jardines filtrantes



2.2.14.2. Pavimentos permeables

Según el Ministerio para la transición ecológica (2019) el pavimento constituye la capa superficial de las áreas urbanas, siendo la primera barrera que entra en contacto con el agua de lluvia.

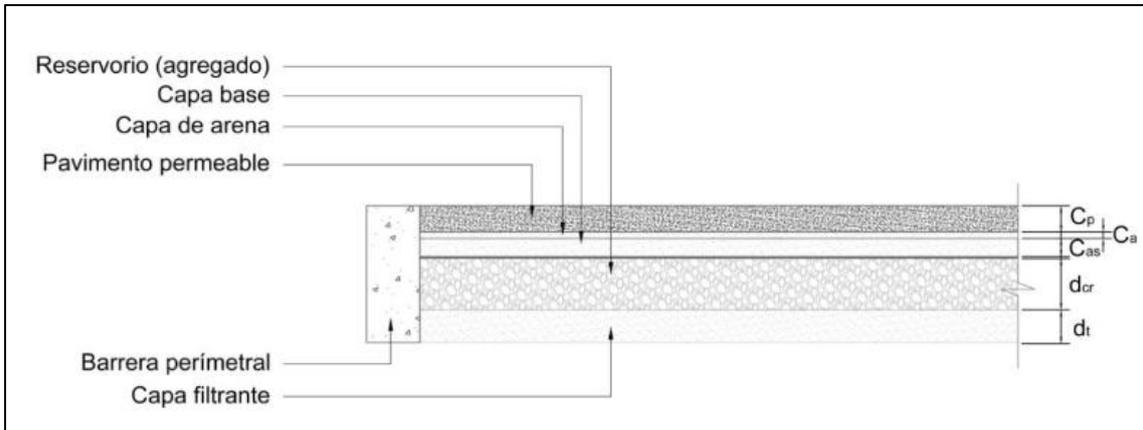
En este sentido, los pavimentos permeables han emergido como una solución innovadora para la gestión más eficaz de las aguas pluviales. Estos pavimentos están diseñados para reemplazar los pavimentos tradicionales, permitiendo que el agua de lluvia penetre directamente hacia el subsuelo, en lugar de su acumulación superficial y generar escorrentía. Este tipo de pavimento no solo abarca la capa superficial visible, sino también una serie de componentes bajo tierra que no se encuentran en los sistemas de pavimentación tradicionales, los cuales facilitan el proceso de filtración e infiltración del agua hacia el terreno subyacente. La adopción de pavimentos permeables contribuye a disminuir la escorrentía superficial, mejorando la calidad del agua y mitigando el riesgo de inundaciones urbanas. Sin embargo, estos sistemas requieren una consideración especial, ya que son más sensibles al peso y la velocidad del tráfico en comparación con los pavimentos tradicionales. Debido a esta característica, su uso no es recomendable en calles de alto tráfico ni en zonas con circulación de vehículos pesados, ya que el tráfico intenso podría dañar la estructura y el funcionamiento del sistema. (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016)

2.2.14.2.1. Dimensionamiento:

Es crucial identificar el tipo de estructura que se empleará, en virtud de que la concepción de los pavimentos permeables se ajusta según el tipo de infiltración seleccionado. (Medina Piza, Et Al., 2018)

Figura 20

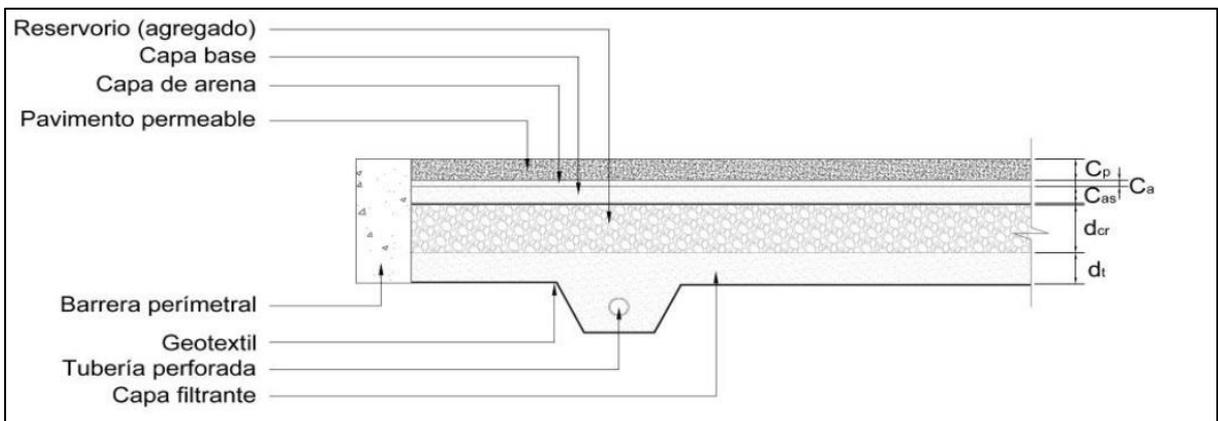
Esquema de un pavimento poroso con infiltración



Nota. Tomado de Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C., por Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016.

Figura 21

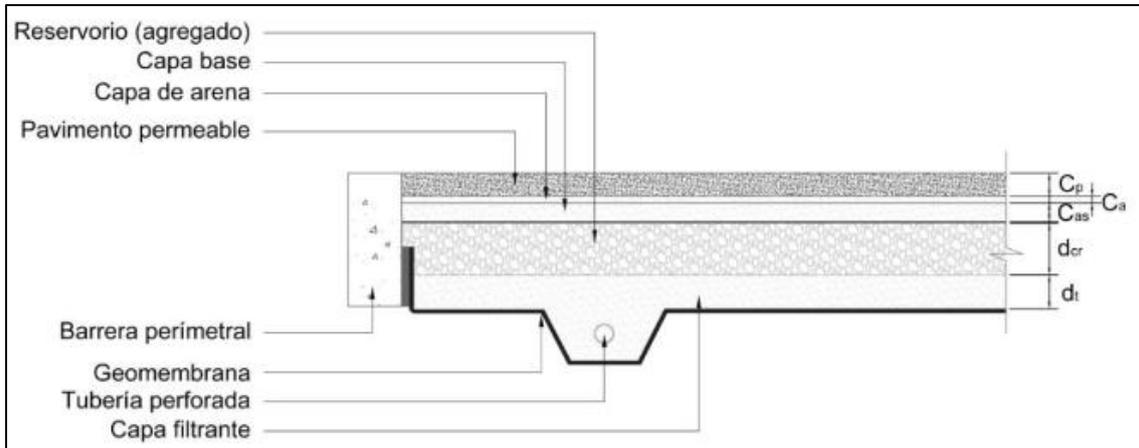
Esquema de un pavimento poroso con infiltración parcial



Nota. Tomado de Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C., por Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016.

Figura 22

Esquema de un pavimento poroso sin infiltración



Nota. Tomado de Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C., por Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016.

2.2.14.2.2. Tipo de pavimento poroso

Es fundamental determinar el tipo de infiltración del pavimento permeable (parcial, completa o nula), lo que depende de las características del terreno y la proximidad a las cimentaciones de estructuras adyacentes. Si no se permite una infiltración completa, se debe dimensionar adecuadamente una sección de salida para garantizar el manejo del agua excedente. Los materiales utilizados para la capa de rodadura incluyen adoquines entrelazados, adoquines de rejillas de concreto, concreto hidráulico permeable y grava porosa. En cuanto a la porosidad, los materiales deben cumplir con ciertos límites: la grava porosa no debe superar el 30% de porosidad, mientras que los otros materiales deben tener una porosidad menor al 40%. Además, se debe tener en cuenta la impermeabilidad efectiva del área de drenaje, lo cual implica analizar las diferentes áreas permeables e impermeables de la zona para un diseño adecuado.

2.2.14.2.3. Volumen de almacenamiento requerido

En la primera etapa del proceso, se determina la dimensión de la cuenca (A_d) y el área destinada para la implementación del pavimento permeable (A_s). Posteriormente, se calcula la proporción de área impermeable del área total. Según las recomendaciones de la Universidad de los Andes y el Acueducto de Bogotá D.C. (2017), se sugiere que el área ocupada por la estructura de pavimento permeable no supere el 5% del área total de drenaje. De este modo, se asegura que la implementación del pavimento permeable no genere un impacto significativo en la escorrentía. Además, se establece la forma de calcular la relación tributaria impermeable (R_t), que es crucial para entender cómo se distribuye el flujo superficial a lo largo de la cuenca y cómo se gestionan las áreas impermeables:

$$R_{im} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * C_i}{A_d}$$
$$R_t = \frac{(A_d - A_s) * R_{im}}{A_s}$$

Donde: A_s : Área del pavimento permeable (m^2), A_d : Área total (m^2), R_{im} : Relación de área impermeable del área total, A_i : Área de drenaje y C_i : Coeficiente de escorrentía

Nota: Es importante saber que R_{im} debe ser inferior a 2, si este valor es mayor, será necesario ajustar el A_d y/o el área destinada para la implementación del pavimento permeable (A_s).

2.2.14.2.4. Longitud entre barreras laterales

La distancia entre las barreras laterales debe establecerse de tal forma que asegure la capacidad de almacenamiento necesaria y prevenga el afloramiento del agua a la superficie. Para conseguir esto, las barreras laterales deben colocarse perpendiculares a la dirección de la escorrentía, garantizando la retención del agua dentro de la estructura sin generar desbordamientos o reflujos.

$$L_{bd} < \frac{2V_c}{S_f A_s n_{cr}}$$

Donde Lbd: Distancia entre barreras laterales (m), Sf: Pendiente del reservorio (m/m), Vc= Volumen diseño (m3), As= Área horizontal (m2) y ncr= Porcentaje de porosidad del reservorio (%)

2.2.14.2.5. Volumen de almacenamiento del reservorio

Se sugiere que el reservorio tenga una profundidad mínima de 15 cm. Además, es necesario considerar la porosidad según las características del material seleccionado para la capa de rodadura del pavimento. A partir de estos datos, se calcula el volumen disponible en el reservorio utilizando la fórmula correspondiente. Es importante destacar que, si la pendiente del sistema es nula (0 m/m), no será necesario diseñar barreras de flujo lateral, y el volumen generado por el reservorio deberá ser suficiente para igualar o superar el volumen de escorrentía que se desea gestionar.

$$V = n_{cr} \cdot \left(d_{cr} - \frac{S_f * L_{bd}}{2} - d_L \right) \cdot A_s$$

Donde Lbd= Distancia entre las barreras de flujo lateral (m), dL= Profundidad del borde libre (m)=0.0254.

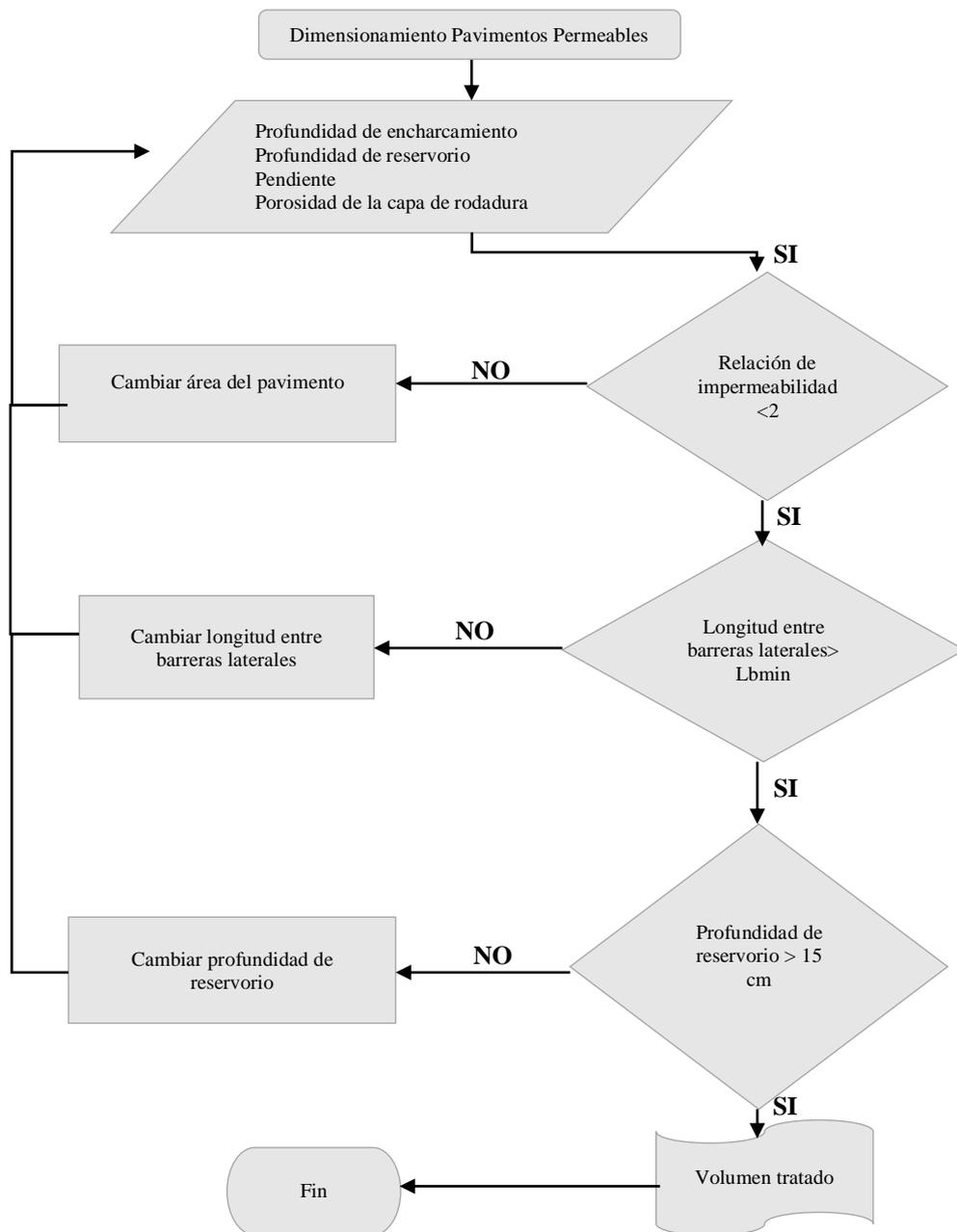
2.2.14.2.6. Salida

En el caso de pavimentos con capacidad de infiltración limitada o inexistente, es necesario calcular la dimensión de la tubería encargada de evacuar el agua excedente, tomando como referencia un periodo de drenaje de 12 horas. Si bien la metodología no especifica directamente el diseño de la profundidad de la capa filtrante, esta debe establecerse considerando las características del terreno y las cargas que el pavimento deberá soportar. Como guía, se sugieren profundidades de alrededor de 15 cm para capas de arena, hasta 20 cm para arena de machaqueo lavada y cerca de 5 cm para grava. Adicionalmente, en

la capa de drenaje donde se instalarán las tuberías perforadas, se aconseja disponer un mínimo de 8 cm de material debajo de la tubería y 15 cm por encima, para asegurar su correcta estabilidad. (Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), 2016)

Figura 23

Diagrama de flujo del dimensionamiento de alcorques inundables



2.2.14.3. Tanques de retención

Los tanques de retención son obras hidráulicas diseñadas para almacenar temporalmente el exceso de agua pluvial durante eventos de lluvias intensas. Su principal función es regular el caudal de descarga hacia el sistema de drenaje o cursos de agua, evitando inundaciones y mitigando el impacto de los picos de escorrentía.

El dimensionamiento depende de los siguientes factores principales:

1. Volumen de Diseño (VVV): Se calcula con base en la tormenta de diseño y el área de drenaje.
2. Duración de la Tormenta de Diseño (t): Relacionada con la intensidad y frecuencia de las lluvias.
3. Coeficiente de Escorrentía (C): Depende de las características de la superficie.
4. Tasa de Liberación (Qsalida): Controlada mediante válvulas o bombas.
5. Tiempo de Vaciamiento (Tv): Generalmente se define para que el tanque pueda vaciarse antes de la siguiente tormenta.

Cálculo del Volumen del Tanque

El volumen del tanque se determina como la diferencia entre el volumen de entrada y la capacidad de calle. Para el cálculo del volumen se utilizó el método gráfico.

2.2.15. MODELO DE SIMULACIÓN SWMM

El Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM, por sus siglas en inglés), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), es un software computacional creado para recrear la generación de escorrentía como su circulación por canales y tuberías, de un sistema de drenaje urbano, considerando tanto la cantidad como la calidad del agua.

Desde sus versiones iniciales hasta la actual 5.2.4, SWMM se ha estructurado en unidades de cálculo (rutinas), donde cada unidad realiza la simulación numérica de un proceso particular vinculado a la hidrología o la hidráulica. emplea principalmente los siguientes bloques de cálculo:

RUNOFF es una rutina que simula la formación de escorrentía superficial y la presencia de contaminantes en la cuenca bajo análisis como resultado de las lluvias.

TRANSPORT es un módulo computacional que se encarga de la traslación tanto del caudal hídrico como de los elementos nocivos a través del sistema de alcantarillado, modelando el régimen de flujo no estacionario mediante la aproximación de la onda cinemática.

EXTRAN es un módulo computacional que se encarga de la propagación del flujo hídrico —sin modelar el transporte de contaminantes— mediante la resolución numérica del sistema completo de ecuaciones de flujo no estacionario unidimensional (ecuaciones de Saint-Venant).

STORAGE/TREATMENT es un módulo computacional que simula la dinámica del flujo hídrico y de los contaminantes dentro de estructuras de almacenamiento o en instalaciones de tratar aguas.

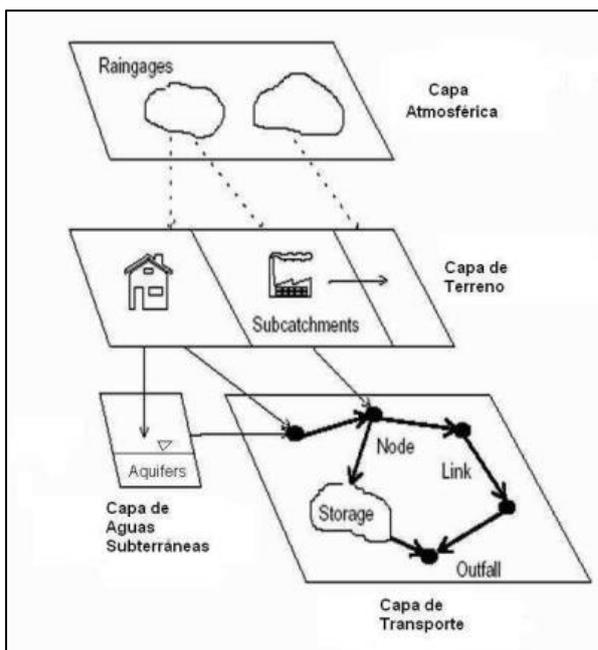
2.2.15.1. Esquema de modelación usado por SWMM

SWMM es una herramienta de simulación numérica enfocada en el análisis, estudio y diseño de sistemas de drenaje urbano. Su objetivo principal es modelar la formación de escorrentía y las concentraciones de contaminantes en subcuencas, así como el transporte de estos volúmenes a través de la red de drenaje urbana hasta un punto de descarga. Para un uso efectivo de SWMM 5.2, resulta fundamental entender cómo representa un sistema de drenaje, los elementos que lo integran y las interrelaciones existentes entre ellos. (Gómez Valentín, 2007)

Asimismo, SWMM concibe el sistema de drenaje como un ensamblaje de elementos y objetos estructurados en capas. Cada capa describe, de manera amplia, distintos procesos hidrológicos o hidráulicos, tales como la lluvia o el transporte de aguas de. La siguiente representación gráfica ilustra el modelo conceptual del sistema de drenaje adoptado por SWMM.

Figura 24

Modelo conceptual del sistema de drenaje urbano

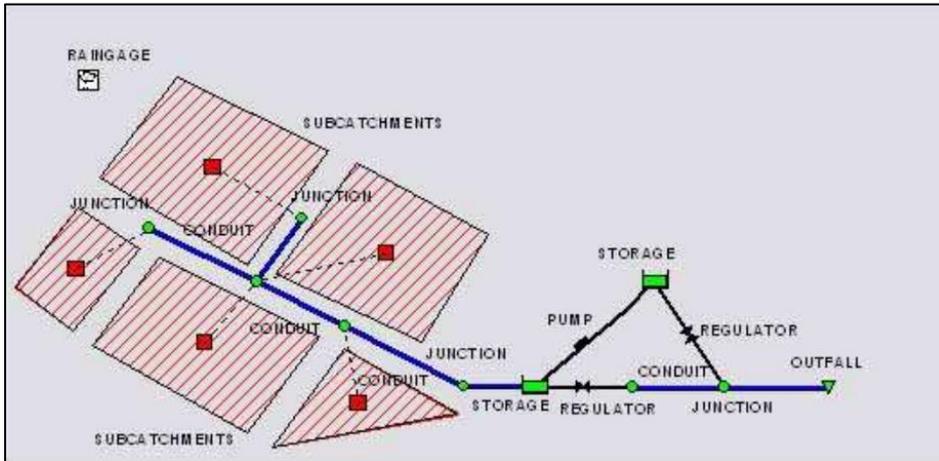


Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

2.2.15.2. Elementos visuales del sistema de drenaje y su representación con SWMM

Figura 25

Disposición de objetos visuales para representar un sistema de drenaje en SWMM



Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

Objetos tipo Node (nodo)

- **Junction:** es un elemento que actúa como punto de enlace entre dos o más conductos. Puede representar distintos componentes del sistema, como pozos de inspección, intersecciones de calles, uniones de conductos de drenaje o nodos de conexión. Las características elementales requeridas para una Junction incluyen la cota de fondo y la elevación de la superficie del terreno.
- **Outfall:** Se refiere a los puntos finales de la red de drenaje, donde se establecen las condiciones límite en la dirección del flujo, particularmente cuando se emplea el método de la Onda Dinámica para simular el movimiento del agua. Un Outfall solo puede conectarse a un conducto y requiere información como la elevación de su base y el tipo de condición de descarga.
- **Storage Unit:** es un tipo de nodo diseñado para almacenar un volumen determinado de agua. Se utiliza para modelar depósitos de retención de diferentes

dimensiones y características, permitiendo representar almacenamientos con o sin estructuras de derivación.

- **Flow Divider (divisor del flujo):** es un nodo especializado que dirige el flujo entrante de manera controlada hacia diferentes conductos, de acuerdo con criterios específicos de separación o regulación.

Objetos tipo link:

- **Conduit (conducto):** se refiere a las estructuras que facilitan el transporte del flujo a lo largo de la red. Estos objetos representan tuberías, alcantarillas o canales que permiten el movimiento del agua entre nodos. En SWMM, estos conductos se caracterizan por su extensión, la identificación de los nodos de inicio y fin, la sección transversal y su coeficiente de aspereza, entre otras características.
- **Flow Regulator (regulador de flujo):** representa estructuras hidráulicas o dispositivos diseñados para controlar el caudal, desviar parte del flujo o evitar condiciones no deseadas de presión en la red de drenaje. Se modela como un conector entre dos nodos, ubicado en el nodo aguas arriba donde se necesita regular el flujo.

2.2.15.3. Métodos de cálculo

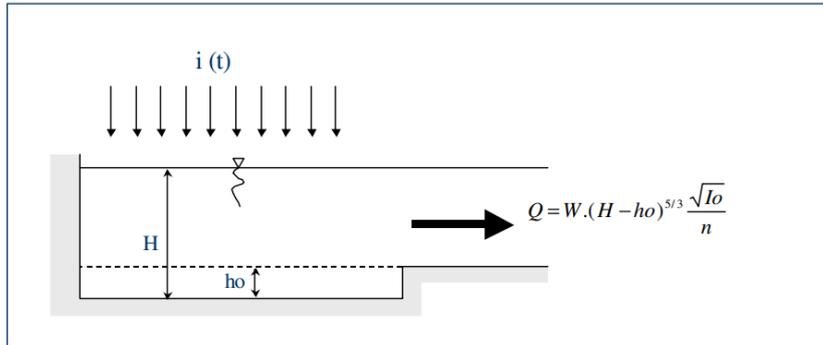
El SWMM hace uso de cuatro módulos informáticos: RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN y STORAGE/TREATMENT. Entre estos, los módulos fundamentales utilizados para convertir la precipitación en escorrentía y para el análisis hidráulico de las obras de drenaje son:

MÓDULO RUNOFF: Este módulo se emplea para calcular la escorrentía generada por una lluvia específica en cada una de las subcuencas urbanas. Los cálculos de la escorrentía se basan en una formulación híbrida que combina modelos de depósito y de onda

cinemática. (Gómez Valentín, 2007) Esta formulación asume que la subcuenca urbana en estudio presenta un comportamiento de depósito lineal (ver Figura 27).

Figura 26

Esquema de depósito usado en SWMM



Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

En este enfoque, el depósito inicialmente asume una abstracción, indicando que no se produce escorrentía hasta que ocurre una precipitación efectiva. La dinámica del depósito sigue la siguiente ecuación de equilibrio de masa.

$$I - Q = \frac{\partial S}{\partial t}$$

Donde I representa el caudal de entrada (relacionado con la precipitación que incide sobre la subcuenca), Q es el caudal de escorrentía generado (caudal de salida), y S es la capacidad de almacenamiento dentro de la subcuenca. Para resolver esta ecuación de tres términos, siendo el caudal de entrada el único conocido, se parte de la suposición de que el nivel de agua disponible para generar el caudal de escorrentía ($H-h_0$) coincide con el tirante normal asociado al caudal de escorrentía generado. (Gómez Valentín, 2007) En consecuencia, la ecuación del depósito lineal se expresa de la siguiente manera:

$$A * i(t) - 0.5W \frac{\sqrt{I_0}}{n} \left((H_{i+1} - h_0)^{5/3} + (H_i - h_0)^{5/3} \right) = A \frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta t}$$

Donde:

A : Área horizontal

$i(t)$: Intensidad de precipitación

W : Ancho

H : Profundidad de agua

h_0 : Profundidad inicial

I_0 : Pendiente media de la subcuenca

La solución de esta ecuación se lleva a cabo mediante métodos numéricos, iterando sobre los valores del nivel de agua y el caudal de entrada en cada intervalo de tiempo. Es importante señalar que este procedimiento no modela el comportamiento del agua en la subcuenca urbana, sino que se centra en la obtención del caudal de salida. (Gómez Valentín, 2007)

Además, para llevar a cabo sus cálculos, este módulo demanda la introducción de diversos datos, entre ellos, información meteorológica (hietograma de diseño), detalles de las subcuencas (área, ancho, pendiente media, coeficiente de rugosidad de Manning, volumen de almacenamiento), parámetros de infiltración (pudiendo utilizar métodos como Horton, Green-Ampt y el Número de Curva (CN) del SCS), características de los canales de drenaje (sección geométrica, coeficiente de rugosidad de Manning, calado máximo admisible o inicial, puntos de salida con sus respectivos parámetros) y otros elementos, incluida la duración de la simulación. (Gómez Valentín, 2007)

MÓDULO EXTRAN (Extended Transport Module): Este módulo emplea los resultados obtenidos en el módulo RUNOFF como datos de entrada para simular y representar el flujo de agua, sin considerar contaminantes, a lo largo del sistema de drenaje, el cual incluye conductos, nodos y depósitos. Esta simulación se realiza mediante tres enfoques

distintos de cálculo hidráulico: Régimen Permanente, Onda Cinemática y Onda Dinámica. El Cuadro 2.9 resume de manera concisa las metodologías utilizadas para el flujo tanto permanente como no permanente. (Gómez Valentín, 2007)

El módulo EXTRAN aborda las ecuaciones completas de régimen no permanente unidimensional, también conocidas como las ecuaciones de Saint-Venant

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

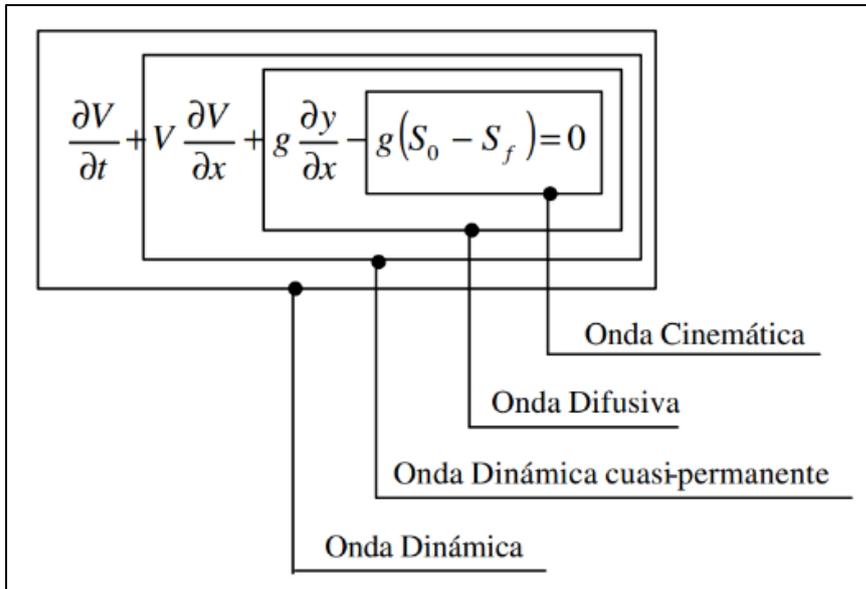
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2}{\partial x A} + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(S_0 - S_f) = 0$$

Donde, q denota un flujo de entrada normalmente distribuido, y es la profundidad de agua, S_0 la inclinación del fondo, S_f la pendiente de fricción, g la gravedad, x la distancia y t el tiempo.

Las ecuaciones de Saint-Venant, empleadas para simular el movimiento del agua en una dimensión, son un conjunto de expresiones matemáticas que involucran derivadas parciales. Estas ecuaciones se caracterizan por su naturaleza no lineal e hiperbólica, lo que implica una complejidad inherente que impide encontrar una solución matemática precisa mediante métodos analíticos directos (Gómez Valentín, 2007). Por esta razón, se hace imprescindible el uso de técnicas numéricas para obtener soluciones aproximadas que permitan comprender y predecir el comportamiento del flujo. En la Figura 26, se ilustran los métodos numéricos más frecuentemente utilizados para abordar este tipo de problemas.

Figura 27

Aproximaciones de solución a las ecuaciones de Saint-Venant



Nota. Tomado de Curso de hidrología urbana, por Gómez Valentín, 2007.

Cada una de las técnicas de aproximación, que también integra la ley de conservación de la masa (ecuación de continuidad), se distingue por los elementos que incluye en sus cálculos:

Onda Dinámica: Este método abarca la totalidad de los componentes de la ecuación de movimiento, considerando las fuerzas de inercia, presión, gravedad y fricción. Por esta razón, se considera la representación más precisa del comportamiento real.

Onda Dinámica cuasi-permanente: Esta variante simplifica la Onda Dinámica al omitir únicamente el término relacionado con el cambio de la velocidad en un punto fijo a lo largo del tiempo (variación local de la velocidad), dentro de los componentes de inercia.

Onda Difusiva: Este método simplifica aún más al descartar por completo todos los términos asociados a la inercia del fluido en la ecuación de movimiento.

Onda Cinemática: solo toma en cuenta el equilibrio de fuerzas entre gravedad y fricción en la ecuación dinámica.

En consecuencia, el módulo EXTRAN emplea el método iterativo de aproximación de Onda Dinámica, para resolver estas ecuaciones en todos los conductos y aplica la ecuación de continuidad en los nodos, llevando a cabo la resolución de manera secuencial. De este modo, los conductos transfieren el flujo de un nodo a otro, calculando el caudal en cada conducto y el calado en cada nodo para cada intervalo de tiempo. Esta secuencia contribuye a simplificar algunas variables de la ecuación y a disminuir el tiempo de cálculo durante el proceso de simulación en SWMM. (Gómez Valentín, 2007)

Tabla 9

Metodologías de cálculo hidráulico empleados por el programa SWMM

Características	Flujo Permanente	Flujo no Permanente	
	Uniforme	Onda Cinemática	Onda Dinámica
Datos del estudio hidrológico	Qmax	Hidrograma Q/t	Hidrograma Q/t
Condiciones de contorno	NO	Solo aguas arriba	Ag. Arriba y Ag. Abajo
Efectos de reflujos	NO	NO	SI
Geometría de la red	CON DETALLE	CON DETALLE	MUY EN DETALLE
Atenuación de Caudal Punta	NO	NO	SI
Efectos dinámicos (Aceleración)	NO	NO	SI

Fuente: (Gómez Valentín, 2007)

Entonces, el módulo EXTRAN necesita información del módulo RUNOFF, así como el intervalo de tiempo para el cálculo de las ecuaciones, la duración total de la simulación, detalles de los colectores (geometría de la sección, longitud, elevación de los extremos,

coeficiente de rugosidad de Manning), características de los nodos (cota de la solera del terreno), condiciones de límite, situaciones especiales de flujo (entrada de carga), reguladores de flujo (orificios, vertederos y salidas), estaciones de bombeo y depósitos de almacenamiento, cada uno con sus respectivos parámetros definidos en el programa SWMM. (Gómez Valentín, 2007)

2.2.15.4. Herramientas de modelación LID

En la versión 5 del SWMM se integraron instrumentos para la modelización de infraestructuras de Desarrollo de Bajo Impacto (LID, por sus siglas en inglés). Estas herramientas se componen de una secuencia de estratos verticales con atributos particulares, concebidas para simular el comportamiento hidráulico de diversas clases de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). La representación gráfica de los LID se presenta en la figura, donde se distinguen tres estratos principales que se modelan de forma independiente. No obstante, dependiendo del tipo de infraestructura LID que se esté considerando, podría no ser necesario incluir uno o más de estos estratos en el modelo matemático. (Medina Piza, Et. Al., 2018)

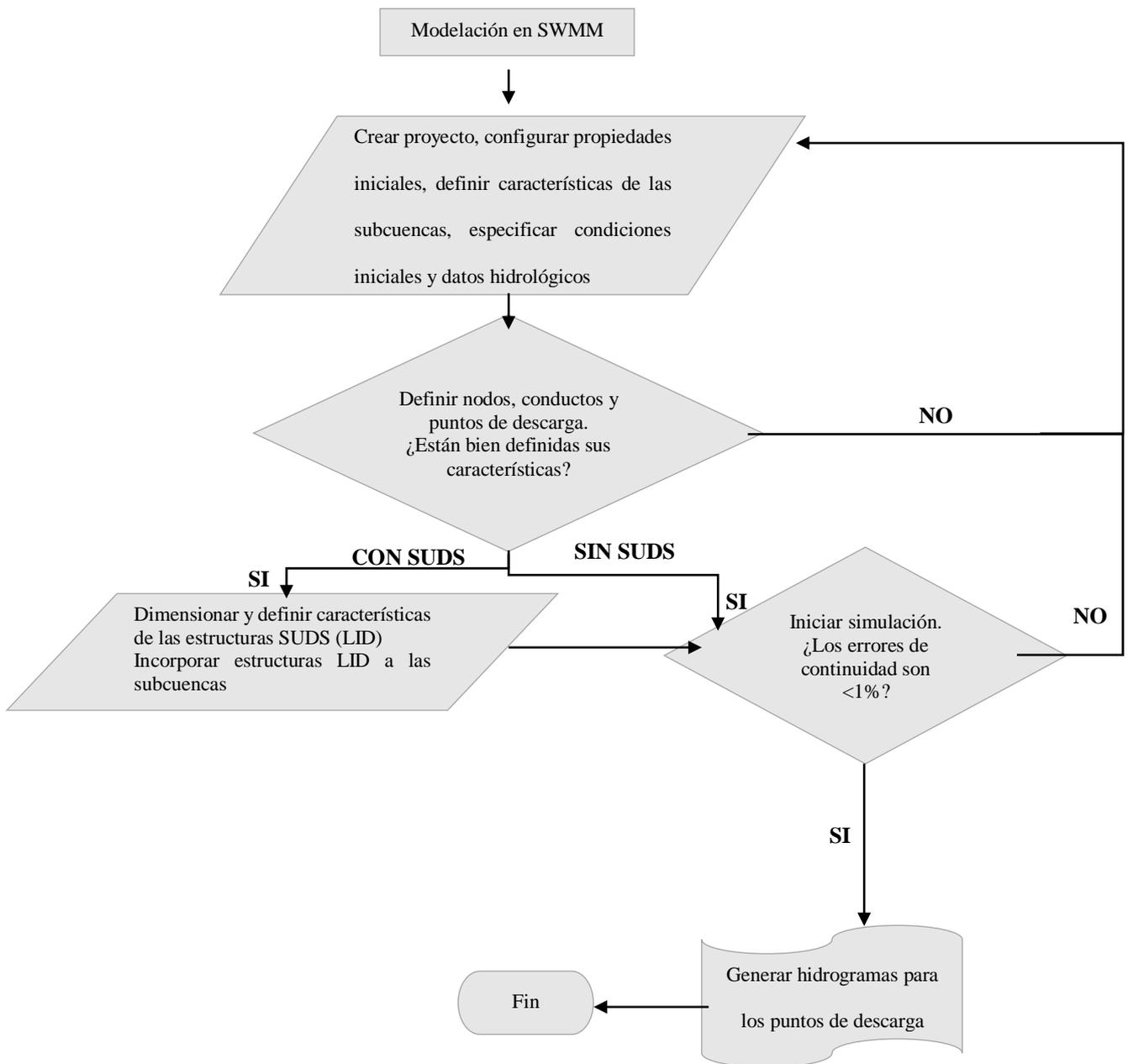
Parámetros para modelación LID

Para modelar las estructuras LID en SWMM, se deben seguir dos fases. En la primera fase, se define la estructura LID, seleccionando la tipología a modelar y especificando las propiedades de cada capa vertical que la compone. Es posible incluir múltiples tipologías en un solo modelo, asignándolas a una misma área de drenaje. En una segunda etapa, se asignan las tipologías a las cuencas de drenaje, permitiendo distribuir varias tipologías según el porcentaje de la superficie que se estima que cada una trate de manera efectiva. (Medina Piza, Et Al., 2018)

2.2.16. Diagrama de flujo del proceso de generación de caudales de descarga en SWMM

Figura 28

Diagrama de flujo del proceso de generación de caudales de descarga en SWMM



2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Drenaje urbano: De acuerdo con el Instituto Nacional de obras sanitarias de Venezuela (1979) se entiende como un compendio de acciones, tanto físicas como estratégicas, cuyo propósito fundamental es minimizar, en la medida de lo factible, los perjuicios que las aguas de lluvia puedan ocasionar a los ciudadanos o a sus bienes en los entornos urbanos, así como prevenir interrupciones en el desenvolvimiento habitual de la vida en la ciudad. En esencia, su meta es asegurar que las aguas pluviales sean administradas de forma eficaz para alcanzar los objetivos definidos, salvaguardando de esta manera la infraestructura y la seguridad dentro del ámbito urbano.

Inundación pluvial: es el resultado de los efectos negativos derivados de la urbanización. Factores como la impermeabilización del suelo, la aceleración de los escurrimientos, la obstrucción del drenaje natural y la artificialización de los arroyos, acequias y ríos en áreas urbanas, contribuyen significativamente a este fenómeno. Como consecuencia, los centros urbanos experimentan una mayor cantidad de escorrentía pluvial que no es evacuada de manera eficiente, superando la capacidad del sistema de drenaje y generando problemas de inundación, especialmente durante lluvias intensas. (Bertoni et al., 2004)

Modelo SWMM: De acuerdo con la publicación en la página web de la Universidad Politécnica de Valencia (2010). El SWMM se presenta como una herramienta dinámica y robusta capaz de recrear la generación de escorrentía como su circulación por canales y tuberías. Esto facilita el análisis cuantitativo y cualitativo del agua durante eventos de precipitación aislados o prolongados. Adicionalmente, permite una modelización aproximada de sistemas de drenaje duales, considerando dos redes principales que operan a distintos niveles (como calles y colectores). También ofrece la posibilidad de simular un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible mediante la incorporación de controles de Desarrollo de Bajo Impacto en las subcuencas urbanas.

Sistema de drenaje pluvial: De acuerdo Palacios Ruiz (2004) se entiende como un compendio de infraestructuras y construcciones (que incluyen elementos como sumideros, colectores y canales, entre otros) ideadas para capturar y dirigir las aguas de lluvia hacia un punto de vertido previamente establecido. Su objetivo primordial es prevenir que estas aguas ocasionen anegamientos o problemas asociados dentro del área urbanizada. Un diseño apropiado de este sistema de drenaje resulta crucial para asegurar

la operatividad y la seguridad de la urbanización, constituyendo además un factor determinante de primer orden en la planificación urbana.

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Son estrategias concebidas para la administración de las aguas pluviales y la planificación urbana de tal forma que se procure emular el ciclo hidrológico inherente a la naturaleza. El propósito fundamental de los SUDS radica en disminuir los efectos adversos de la urbanización en el volumen y las características del agua de escorrentía pluvial. Adicionalmente, buscan enriquecer el equilibrio estético y ecológico de las ciudades, fomentando un entorno más sostenible y en concordancia con el medio natural. (Perales Momparler & Andrés Doménech, 2008)

Caudal de descarga: Es el volumen de agua que transita por una sección particular dentro de un sistema hidráulico, ya sea un conducto, canal o tubería, y que es vertido en un punto de salida establecido. Este concepto es frecuentemente utilizado en el ámbito de los sistemas de drenaje urbano, así como en el estudio de ríos, arroyos y otras masas de agua. La magnitud del caudal de descarga se cuantifica en unidades de volumen divididas por unidades de tiempo. (Palacios Ruiz, 2004)

Escorrentía: es el flujo de agua sobre la capa superficial terrestre, produciéndose cuando la tasa de precipitación supera la capacidad del suelo para absorberla, impidiendo así su infiltración. Este fenómeno se manifiesta principalmente durante episodios de lluvia intensa o prolongada, donde el volumen de agua que llega al suelo excede su umbral de absorción. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019)

Hietograma: es una representación visual de la distribución temporal de la intensidad de la lluvia durante un período específico. Este concepto se utiliza comúnmente en hidrología y meteorología para describir la variación en el tiempo de la precipitación pluvial. El hietograma muestra la intensidad de la lluvia en diferentes intervalos de tiempo, lo que permite analizar y modelar el impacto de la lluvia en procesos hidrológicos, como la escorrentía y la respuesta de los sistemas de drenaje. (Instituto Nacional de obras sanitarias de Venezuela, 1979)

Hidrograma: es una representación gráfica que ilustra cómo el caudal de agua varía en un punto específico de un sistema hídrico a lo largo del tiempo. Resulta una herramienta valiosa para comprender la respuesta de una cuenca hidrográfica ante un evento de precipitación, permitiendo el análisis del tiempo de concentración, las magnitudes máximas del caudal y la duración del incremento del flujo. (Chow, Et. Al., 1994)

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Ubicación Geográfica

El presente trabajo se realizó en la avenida Hoyos Rubio entre la vía de evitamiento norte y el jirón Armando Revoredo, del distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca.

Además, se encuentra en la parte Este de la ciudad de Cajamarca delimitada por el norte jirón Sta. Teresa de Journet, por el sur jirón Luis Ortiz, por el este jirón Armando Revoredo y por el oeste avenida vía de evitamiento norte. Las coordenadas de los puntos límites de la zona de estudio antes mencionado son:

Tabla 10

Coordenadas referidas al Datum Wgs84 Zona 17 Sur

PUNTO	Norte	Este
Limite por el norte	9209508.62	775727.08
Limite por el sur	9208722.34	775708.10
Limite por el oeste	9209282.87	775225.21
Limite por el este	9208990.59	776342.36

3.1.2. Ubicación política

El área de investigación se localiza en la provincia de Cajamarca, dentro de la región homónima, situada en la parte septentrional del Perú. Sus límites geográficos son al norte con la provincia de Hualgayoc, al sur con el departamento de La Libertad, al este con la provincia de San Marcos y al oeste con la provincia de Contumazá.

Figura 29

Plano de localización a nivel nacional

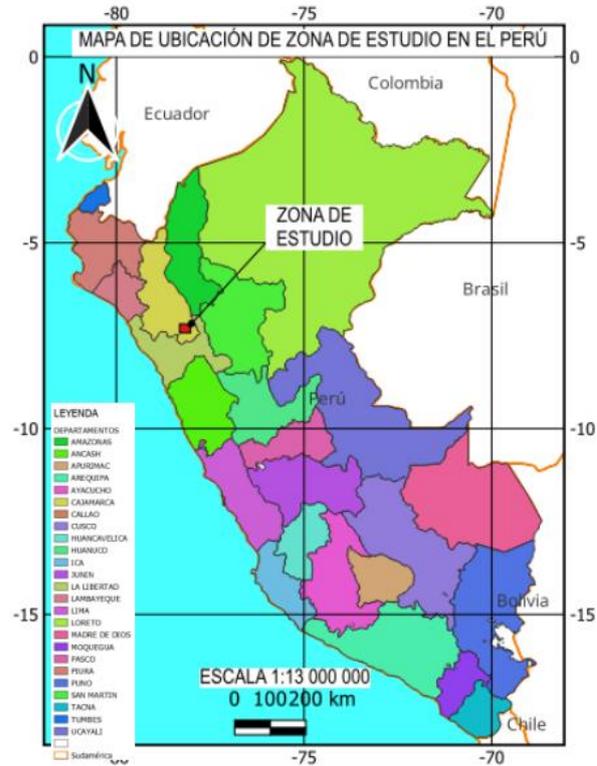


Figura 30

Plano de localización a nivel regional

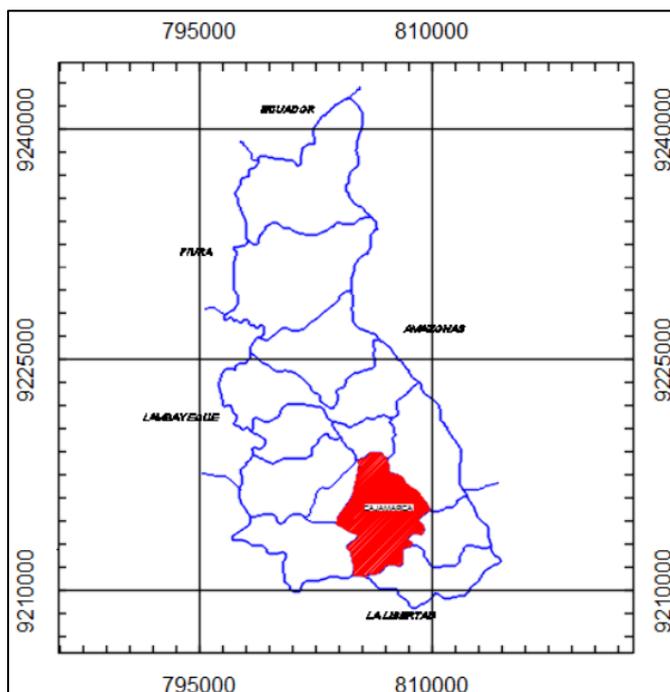


Figura 31

Plano de localización a nivel distrital.

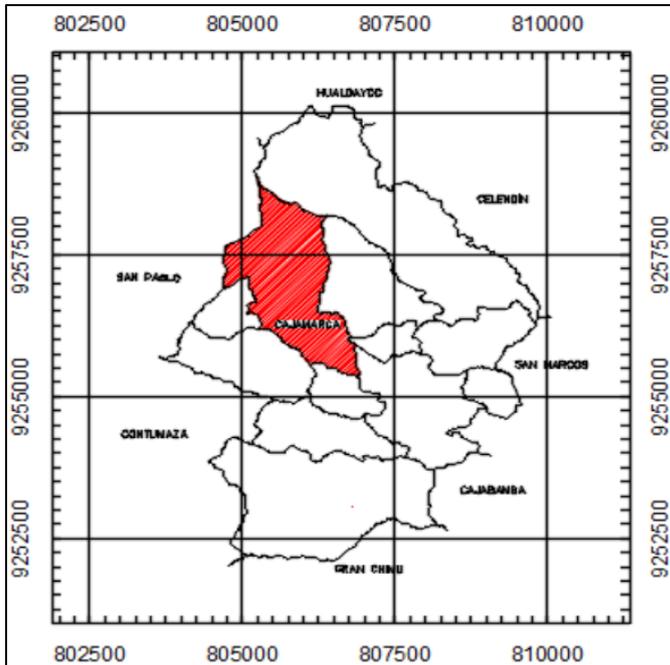
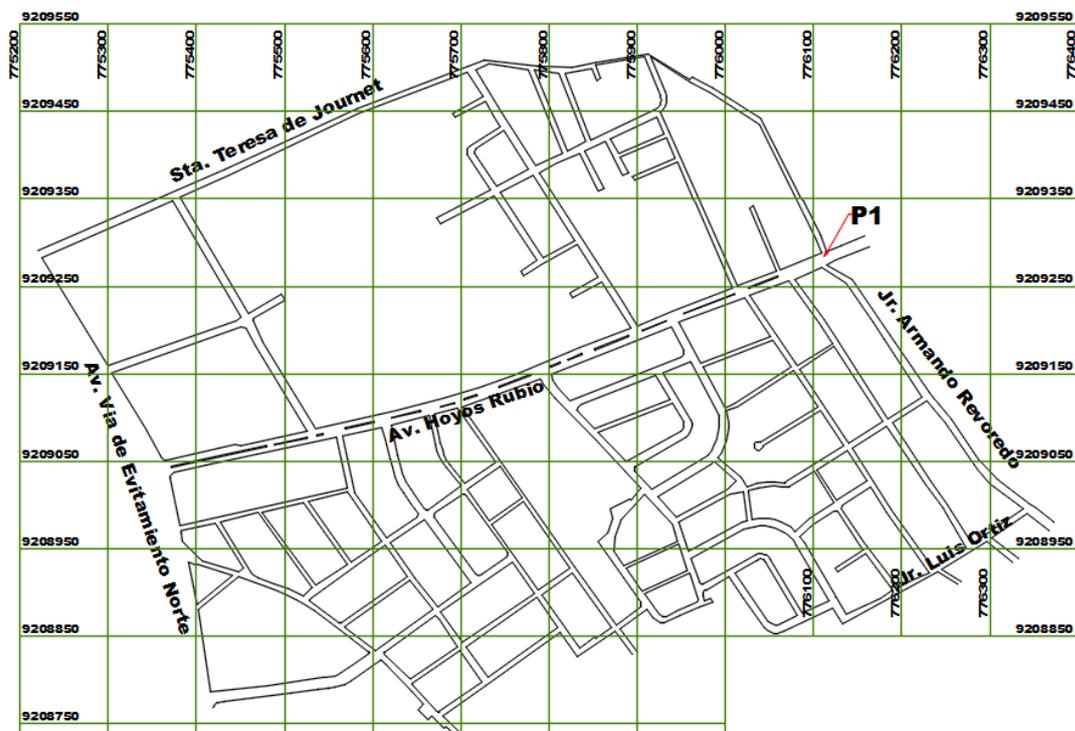


Figura 32

Plano de localización de la zona de estudio



3.2. Metodología de la investigación

3.2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es descriptiva-correlacional, ya que tiene como objetivo describir y comprender las condiciones actuales de la localidad en estudio. Se recoge información detallada sobre la zona en cuestión, permitiendo realizar un análisis exhaustivo. Además, se evalúan los componentes involucrados en el proyecto, sometiéndolos a un análisis conforme a las normas, leyes y manuales vigentes, lo que permite identificar relaciones y correlaciones entre los factores presentes en el entorno estudiado.

3.2.2. Nivel

Con respecto al nivel de investigación, es una aplicada, puesto que se planteó resolver un problema.

3.2.3. Método de investigación

El método de investigación es cuantitativo, debido a que se realizó una comparación de caudales de descarga entre una metodología respecto a la otra.

3.3. Población de estudio

El conjunto de elementos y características hídricas que conforman la cuenca urbana donde se sitúa el área de estudio en el distrito, provincia y departamento de Cajamarca constituye la población para esta investigación.

3.4. Muestra de estudio

Es el área específica en el sector Este de la ciudad de Cajamarca delimitada por el norte el jirón Sta. Teresa de Journet, por el sur jirón Luis Ortiz, por el este jirón Armando Revoredo y por el oeste avenida vía de evitamiento norte, del distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca.

3.5. Unidad de análisis

La unidad de análisis es el sistema de drenaje pluvial de la zona de estudio delimitada por el norte Sta. Teresa de Journet, por el sur jirón Luis Ortiz, por el este jirón Armando Revoredo y por el oeste avenida vía de evitamiento norte, del distrito de Cajamarca.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

Observación directa

Este método fue empleado de manera recurrente y demostró ser fundamental para la caracterización de las condiciones del sistema de drenaje en el área de estudio, así como para la ejecución y obtención de datos hidrológicos y el levantamiento topográfico necesario.

Análisis documental

A través de esta metodología, se reunió y examinó la información pertinente del área de estudio para el desarrollo de la investigación. Esta información abarca fuentes bibliográficas tales como tesis, manuales, artículos científicos y libros, entre otros documentos directamente vinculados con la problemática central de la investigación.

3.6.2. Instrumentos

Cámara de celular, para documentar visualmente

Estación total, para obtener el plano topográfico de la zona de estudio.

Imágenes satelitales de Google Earth, para Identificar las áreas permeables e impermeables.

Software SWMM 5.2. (Storm Water Management Model), para simular el comportamiento hidrológico e hidráulico del área de estudio.

3.7. Técnicas de procesamiento de la información, tratamiento y análisis de datos

Se obtuvieron datos que no requieren un análisis exhaustivo y pueden ser ingresados directamente al software de simulación, Sin embargo, otros datos recopilados necesitaban ser procesados previamente para ajustarlos a los parámetros requeridos por el software.

La información recabada durante el levantamiento topográfico fue procesada utilizando el software Civil3D. A partir de este procesamiento, se obtuvieron datos como las extensiones superficiales, las cotas de cada punto, la proporción de áreas no permeables, la capacidad hidráulica del sistema de drenaje pluvial, la longitud de las cunetas y las pendientes de cada subcuenca. Estos datos sirven para ingresar en el Software de simulación SWMM 5.2. los atributos y dimensiones geométricas particulares de cada área de drenaje.

Tormenta de diseño: Se procesó la información del SENAMHI en el software Microsoft Excel para obtener la tormenta de diseño necesario para la simulación en el Software SWMM 5.2.

Modelado Numérico

Escenario 1: Utilizando toda la información recopilada previamente, se llevó a cabo la modelización de las condiciones actuales del drenaje pluvial caracterizado en el software SWMM 5.2 para generar los hidrogramas en los puntos de descarga.

Escenario 2: Adicionalmente a los datos empleados en la primera modelización, se incorporaron técnicas de SUDS con el fin de identificar su influencia en los caudales de descarga observados en los hidrogramas de salida.

3.8. PROCEDIMIENTO

La investigación se planteó en cuatro etapas:

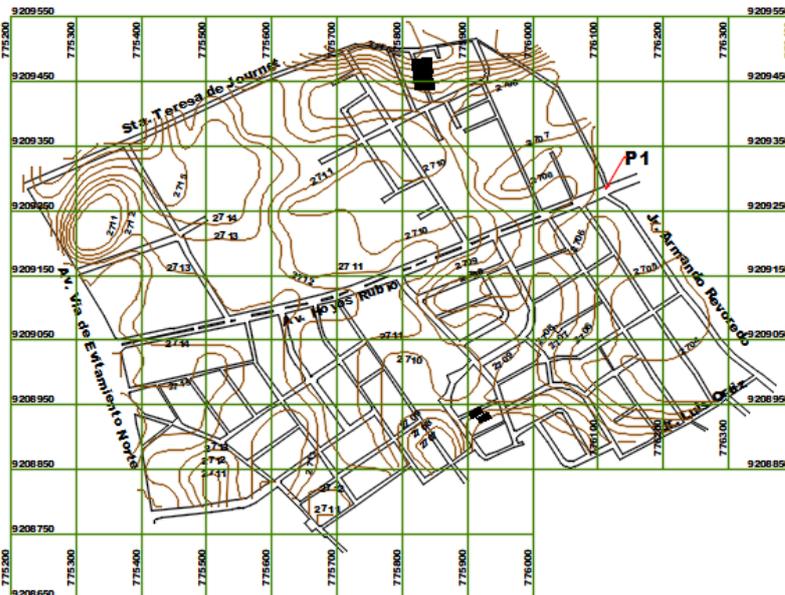
3.8.1. Primera etapa (Recopilación de información)

3.8.1.1. Topografía

El levantamiento topográfico nos proporcionó principalmente información sobre el relieve de la zona de estudio, las superficies de cada subcuenca y el detalle de las calles. Estos datos serán utilizados para asignar las cotas correspondientes a cada nodo en el programa, lo que permitirá calcular las pendientes en el área.

Figura 33

Plano topográfico



3.8.1.2. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales se usarán para delimitar las subcuencas urbanas, definir el uso del suelo y el porcentaje de are impermeable, estos parámetros son necesarios para ingresar en el software SWMM.

3.8.1.3. Infraestructura vial

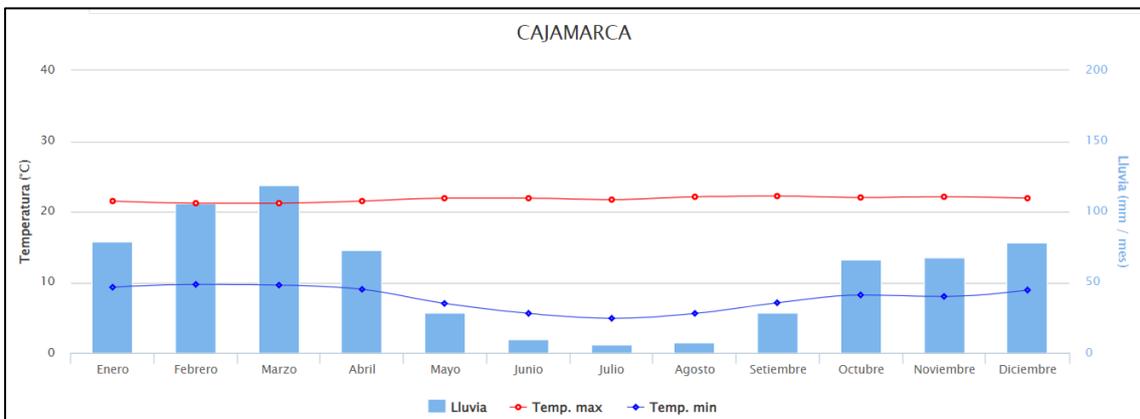
En la zona de estudio se identificó que el 81.25% de las vías son de pavimento rígido, mientras que, el 18.75% restante son calzadas sin pavimentar (solo afirmado). Las aceras son principalmente de concreto y algunas de adoquín.

3.8.1.4. Clima

El clima en la zona urbana es semifrío, con una temperatura media anual de 16° y húmeda. Debido a su cercanía al Ecuador y su ubicación en un piso térmico bajo, la ciudad experimenta inviernos suaves y veranos calurosos y lluviosos. Las mayores precipitaciones ocurren entre diciembre y marzo. (SENAMHI, 2022)

Figura 34

Lluvia, temperatura máxima y temperatura mínima para la ciudad de Cajamarca



Nota. Tomado de Pronóstico del tiempo SENAMHI, por SENAMHI, 2022.

3.8.1.5. Uso del suelo

Según el plan de ordenamiento territorial 2016-2026, elaborado por la Municipalidad Provincial de Cajamarca (2022), la zona de estudio tiene un uso de suelo residencial de densidad baja, media y alta.

Figura 35

Plan de ordenamiento territorial 2016-2026



Nota. Tomado de Reglamento del Plan de Desarrollo Urbano de Cajamarca 2016-2026, por Municipalidad Provincial de Cajamarca, 2022.

3.8.1.6. Información pluviométrica

En esta investigación la información pluviométrica proviene del sitio web destinado a la estimación de curvas IDF. En el contexto del Proyecto Apoyo a la Gestión de Cambio Climático Fase II, impulsado por el SENAMHI y financiado por el Fondo de Cooperación Suiza para el Desarrollo (COSUDE), se creó e implementó una herramienta con el propósito de difundir información crucial. Esta herramienta facilita la integración de los efectos del cambio climático en el diseño y la gestión de la infraestructura de recursos hídricos, mediante el uso de curvas IDF actualizadas. Para lograr este objetivo, se desarrolló un módulo web con una interfaz intuitiva, un sistema de base de datos adaptable y un método eficiente para la actualización de las curvas IDF. Además, permite

la interacción con la base de datos y la descarga de información relacionada con las curvas IDF para diversos periodos de recurrencia (desde 2 hasta 1000 años), con duraciones que típicamente oscilan entre 1 y 24 horas, incluyendo sus respectivos márgenes de confianza. (Felipe-Obando, Et al., 2023)

3.8.2. Segunda etapa (Modelo del sistema actual de drenaje pluvial urbano en SWMM)

3.8.2.1. Procesamiento de datos necesarios para el software SWMM.

a. Parámetros y Características Geométricas de cada subcuenca

Los parámetros fueron establecidos a partir de inspecciones en el lugar, estudios previos e imágenes satelitales. Para una representación más precisa de estos parámetros, se realizó un estudio detallado de la cuenca urbana, analizando cada calle, lo que permitió obtener una visión más realista del comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca. Con un área total de 536649.35 m², resultando en un total de 196 subcuencas urbanas. Se detallan en el apéndice B.

b. Tiempo de concentración de la cuenca

Tabla 11

Tiempo de concentración con Kirpich (1940)

Tramo	L (m)	S (m/m)	Tc (min)
1-2	1256.04	0.042	16.06
2-3	917.13	0.033	13.83
3-4	597.83	0.025	11.07
4-5	488.01	0.021	10.13
Tiempo de concentración total			51.08

Tabla 12

Tiempo de concentración con California Culverts Practica (1942)

Tramo	L (m)	H (m)	Tc (min)
1-2	1256.04	28	20.52
2-3	917.13	22	15.66
3-4	597.83	10	12.94
4-5	488.01	9	10.66
Tiempo de concentración total			59.79

Tabla 13

Tiempo de concentración con Federal Aviation Administración (1970)

Tramo	L (m)	S (m/m)	C	Tc (min)
1-2	1256.04	0.042	0.90	14.19
2-3	917.13	0.033	0.90	13.13
3-4	597.83	0.025	0.90	11.62
4-5	488.01	0.021	0.80	16.68
Tiempo de concentración total				55.63

c. Periodo de retorno

Siendo la zona de investigación importante dentro del desarrollo urbano y estando en proceso de crecimiento, se optó por un periodo de retorno de **25 años**

d. Análisis de tormenta

La información se obtuvo de la página web para la estimación de curvas IDF, desarrollado por el SENAMHI.

Para obtener, las curvas IDF, primero se ubicó la zona de investigación en el módulo web y luego se seleccionó el escenario climático que en nuestro caso es Escenario Histórico.

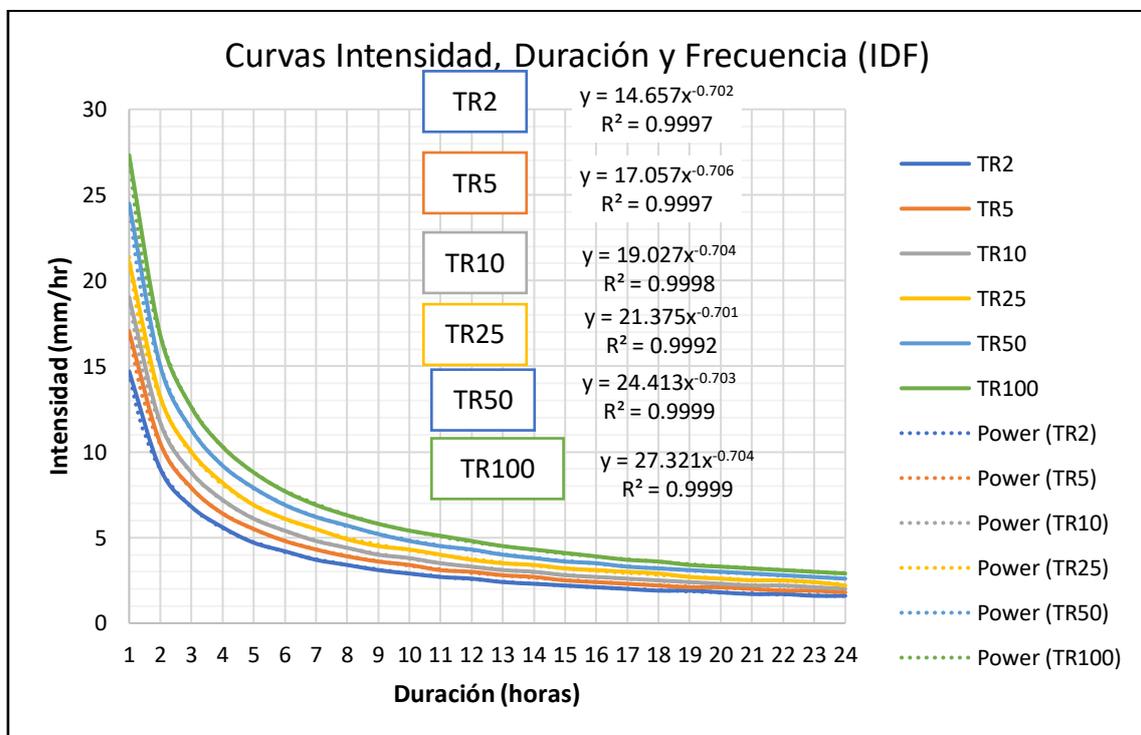
Posteriormente, el módulo web proporcionó la información obtenida en formatos de tablas y representaciones gráficas, mostrando las intensidades de precipitación para

diversas duraciones (expresadas en horas), diferentes tiempos de retorno y sus respectivos márgenes de confianza. Esta información fue luego exportada al software Excel para su posterior análisis y procesamiento.

Posteriormente, en Excel se graficó las curvas IDF, se incluyó su ecuación y su respectivo R2

Figura 36

Curvas IDF



e. Hietograma

Para la investigación, teniendo en cuenta el tiempo de concentración de la zona de estudio, se confeccionó un hietograma de 1 hora con incrementos de 2 minutos, mediante el método de los bloques alternos. Para llevar a cabo este proceso, se eligió la ecuación del periodo de retorno deseado. Con la profundidad de precipitación correspondiente, se determinaron la intensidad y la duración de la lluvia. Calculando las diferencias entre los valores consecutivos de profundidad de precipitación, se obtuvo la cantidad de lluvia a

añadir por cada unidad de tiempo adicional (2 minutos). Estos incrementos o bloques de precipitación se reorganizaron temporalmente de manera que la intensidad máxima se ubicara en el punto medio de la duración requerida, y los bloques restantes se dispusieran en orden descendente, alternando hacia la derecha e izquierda del bloque central, conformando así el hietograma de diseño. Quedando las siguientes tablas:

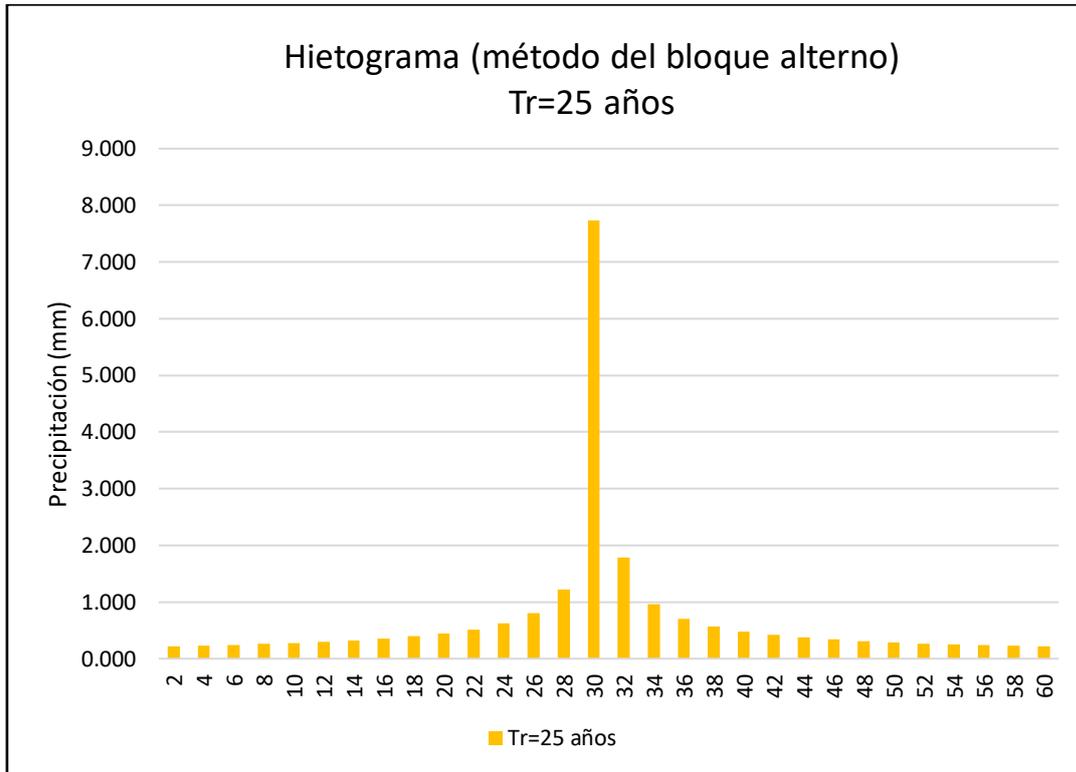
Tabla 14

Método del bloque alterno para tiempo de retorno 25 años

METODO DEL BLOQUE ALTERNO Tr=25 AÑOS				
Duración	Intensidad	Precipitación Acumulada	Precipitación Incremental	Precipitación
min	mm/hr	mm	mm	mm
2	231.94	7.73	7.73	0.221
4	142.67	9.51	1.78	0.232
6	107.38	10.74	1.23	0.246
8	87.77	11.70	0.96	0.261
10	75.06	12.51	0.81	0.278
12	66.05	13.21	0.70	0.299
14	59.29	13.83	0.62	0.324
16	53.99	14.40	0.56	0.355
18	49.71	14.91	0.52	0.394
20	46.17	15.39	0.48	0.445
22	43.19	15.84	0.44	0.516
24	40.63	16.25	0.42	0.623
26	38.41	16.65	0.39	0.807
28	36.47	17.02	0.37	1.226
30	34.75	17.37	0.35	7.731
32	33.21	17.71	0.34	1.780
34	31.83	18.04	0.32	0.965
36	30.58	18.35	0.31	0.701
38	29.44	18.65	0.30	0.563
40	28.40	18.93	0.29	0.477
42	27.45	19.21	0.28	0.417
44	26.57	19.48	0.27	0.373
46	25.75	19.74	0.26	0.339
48	24.99	20.00	0.25	0.311
50	24.29	20.24	0.25	0.288
52	23.63	20.48	0.24	0.269
54	23.01	20.71	0.23	0.253
56	22.43	20.94	0.23	0.239
58	21.89	21.16	0.22	0.226
60	21.38	21.38	0.22	0.216

Figura 37

Hietograma mediante el método de bloque alterno para el periodo de retorno 25 años



f. Número de curva (CN) del SCS

De acuerdo con las características del suelo de la zona de estudio, se considera que pertenece al grupo hidrológico B (Tabla 6) y zona residencial (Tabla 7) tenemos un CN de 85 en condiciones de humedad antecedentes tipo II, como la simulación se va a llevar a cabo con fecha 26/06/2023 se recopiló la lluvia de los 5 días previos a la fecha de simulación teniendo 0 mm, y con ello (Tabla 5) una condición de humedad antecedente tipo I y un número de curva (CN) de:

$$CN(I) = \frac{4.2(85)}{10 - 0.058(85)}$$

$$CN(I) = 70$$

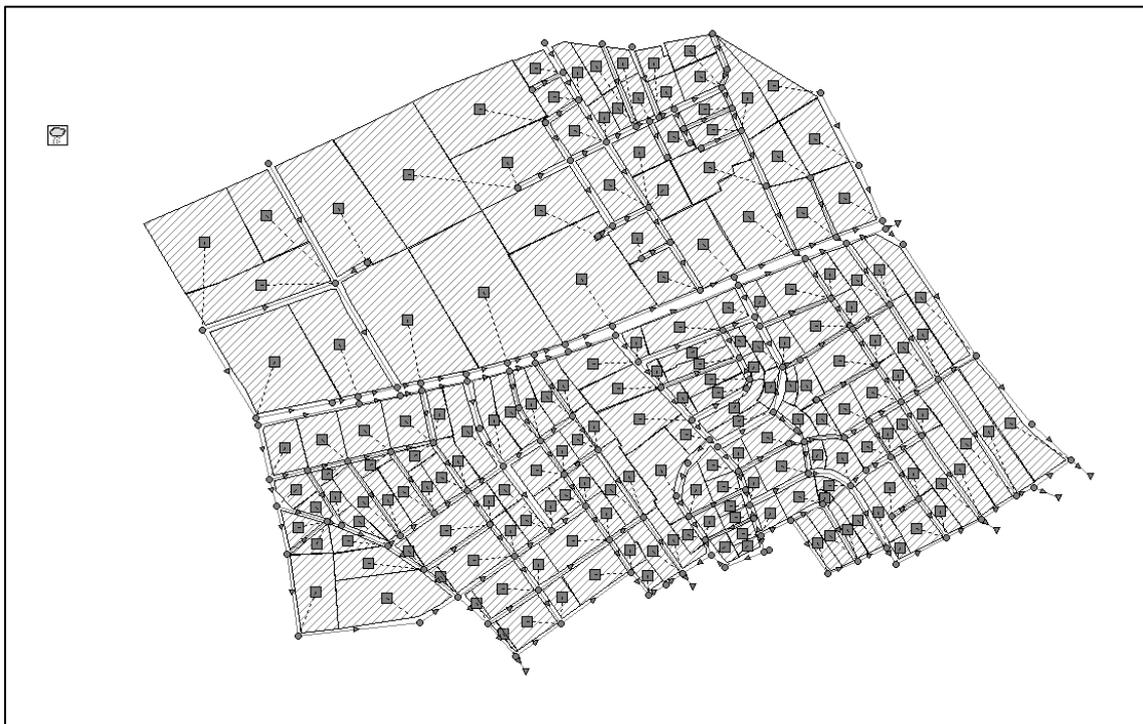
3.8.2.2. Modelo del Sistema Actual de Drenaje Urbano en SWMM

El sistema de drenaje actual se modeló utilizando el hietograma de lluvia de diseño, 196 subcuencas que representan lotes y terrenos. Se incluyeron los datos geométricos de las

subcuencas, como áreas, ancho de cuenca y porcentaje de área impermeable, además de los coeficientes de rugosidad de Manning para superficies permeables e impermeables. Se empleó el método de infiltración SCS Curve Number. El modelo también incluye 167 nodos que representan los puntos de drenaje de las subcuencas, cotas de conexiones obtenidas de planos topográficos, 230 conductos que simulan el drenaje superficial, 01 punto de descarga que representan las condiciones aguas abajo. La Figura 38 muestra el sistema de drenaje esquematizado en el modelo SWMM 5.2, y en el apéndice B se detallan los parámetros utilizados para la simulación.

Figura 38

Esquema de la zona de estudio en SWMM 5.2



Se llevó a cabo la simulación utilizando la aproximación de la onda dinámica como método de cálculo hidráulico, ya que este método resuelve las ecuaciones de Saint-Venant considerando un flujo no permanente en lámina libre. Se estableció un tiempo de simulación de 04 horas, con un intervalo de cálculo hidráulico y un intervalo de análisis de resultados de 10 segundos. Las simulaciones fueron aceptadas porque los errores de

continuidad tanto en la escorrentía superficial como en el cálculo hidráulico no superaron el 1%.

3.8.3. Tercera etapa (Modelo del sistema de drenaje urbano con SUDS)

Teniendo en cuenta que el área está en desarrollo y considerando las condiciones topográficas y otros factores del lugar, se seleccionaron tipologías que minimicen el impacto urbanístico en la zona. Las tipologías elegidas para el estudio son jardines filtrantes, pavimentos permeables y tanques de retención, ya que se adaptan mejor al sector, permitiendo su implementación en espacios públicos de las vías existentes, como andenes, separadores, o calzadas con poco tráfico. Estas tipologías se enfocan en reducir el volumen de escorrentía y mejorar la calidad del agua.

3.8.3.1. Sistema 01: Pavimentos filtrantes

Los pavimentos filtrantes, se diseñaron en la Av. Hoyos Rubio, con infiltración nula por ello cuenta con una tubería perforada en el fondo para recolectar el agua que no logra infiltrarse.

a. Dimensionamiento

Teniendo en cuenta una profundidad de lluvia (hp) de 15 mm, habiendo obtenido las áreas para esta tipología en AutoCAD, además de las propiedades del material filtrante interno, las propiedades del pavimento filtrante seleccionado y la capacidad de infiltración del suelo en el que se encuentra, tenemos el siguiente dimensionamiento.

Tabla 15

Dimensionamiento de pavimento permeable

Variable	Valor	Unidades
Área Total (Ad)	3987.31	m2
Altura de la lluvia (hp)	15	mm
Volumen de Calidad (Vc)	40.07	m3
Tipo de Infiltración	NULA	
Tipo de capa de rodadura	Concreto Permeable	
Área del Pavimento permeable (As)	20	m2
Profundidad del reservorio (dcr)	0.5	m
Porosidad (ncr)	0.4	
Pendiente del terreno (sp)	0.025	m/m
Pendiente en la base del reservorio (sf)	0.025	m/m
Longitud entre las barreras de flujo lateral (Lbd)	10.00	m
Impermeabilidad efectiva	67.37	
Relación de impermeabilidad (Rim)	0.67	
Relación tributaria impermeable (Rt)	132.90	
Longitud máxima entre barreras (Lbmax)	6411.59	m
Volumen provisto a partir del reservorio	2.8	m3

Tabla 16

Resumen de diseño de pavimentos permeables

Pavimentos	Área total (m2)	Vc (m3)	Numero de estructuras	Longitud (m)	Volumen tratado (m3)	% de tratamiento
P1	20	40.07	1.00	12.49	5.80	72.33
P2	20	40.07	1.00	17.50	5.80	72.33
P3	60	40.07	3.00	30.00	17.39	72.33
P4	200	91.71	10.00	106.10	57.97	63.21
P5	240	76.46	12.00	121.19	69.56	90.98
P6	80	27.32	4.00	49.70	23.19	84.88
P7	80	38.07	4.00	45.70	23.19	60.91
P8	40	13.07	2.00	20.00	11.59	88.71
P9	20	6.63	1.00	10.00	5.80	87.46
P10	20	8.10	1.00	10.00	5.80	71.57
P11	20	4.80	1.00	10.00	5.80	120.78
P12	40	13.61	2.00	20.00	11.59	85.21
P13	40	18.90	2.00	20.00	11.59	61.34
P14	40	13.81	2.00	20.00	11.59	83.94
P15	20	9.66	1.00	10.00	5.80	60.02

3.8.3.2. Sistema 02: Jardines Filtrantes

Los jardines filtrantes, se diseñaron en la Av. Hoyos Rubio, con infiltración nula por ello cuenta con un tubo agujereado en el fondo para recolectar el volumen que no logra infiltrarse.

a. Dimensionamiento

Teniendo en cuenta una profundidad de lluvia (hp) de 15 mm, habiendo obtenido las áreas para esta tipología en AutoCAD, además de las propiedades del material filtrante interno.

Tabla 17

Dimensionamiento de jardín filtrante

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen de calidad área 1 (Vc1)	40.07	m3
Longitud área 1 (L1)	12.09	m
Pendiente lateral (Z:1)	0.00	
Ancho total de la sección transversal (Ws)	1.80	m
Área superficial (As)	21.76	m2
Área de fondo (Af)	21.76	m2
Profundidad de encharcamiento (d)	0.20	m
Porosidad del suelo filtrante (nm)	0.40	
Profundidad del suelo filtrante (dm)	0.50	m
Profundidad de la capa de drenaje (dc)	0.33	m
Porosidad de la capa de drenaje (ng)	0.40	
Volumen (V)	11.58	m3

Tabla 18

Resumen de diseño de jardines filtrantes

Jardín Filtrante	Área m2	Vc (m3)	Numero de estructuras	Longitud (m)	Volumen tratado (m3)	% de tratamiento
A1	21.76	40.07	1.00	12.09	11.58	140.49
A2	30.78	40.07	1.00	17.10	16.37	140.49
A3	53.28	40.07	1.00	29.60	28.34	140.49
A4	190.26	91.71	1.00	105.70	101.22	110.36
A5	217.42	76.46	1.00	120.79	115.67	151.28
A6	88.74	27.32	1.00	49.30	47.21	172.83
A7	81.54	38.07	1.00	45.30	43.38	113.95
A8	35.28	13.07	1.00	19.60	18.77	143.61
A9	17.28	6.63	1.00	9.60	9.19	138.70
A10	17.28	8.10	1.00	9.60	9.19	113.50
A11	17.28	4.80	1.00	9.60	9.19	191.54
A12	35.28	13.61	1.00	19.60	18.77	137.94
A13	35.28	18.90	1.00	19.60	18.77	99.30
A14	35.28	13.81	1.00	19.60	18.77	135.89
A15	17.28	9.66	1.00	9.60	9.19	95.18

3.8.3.3. Sistema 03 tanque de retención

El tanque de retención se ubicará bajo la berma central en la avenida Hoyos Rubio, para determinar su ubicación se ha calculado la capacidad de calle, desde la cuadra 10 hasta la cuadra 14.

Cálculo de capacidad de calle avenida Hoyos Rubio

Figura 39

Sección transversal av. Hoyos Rubio tramo 1 – 4

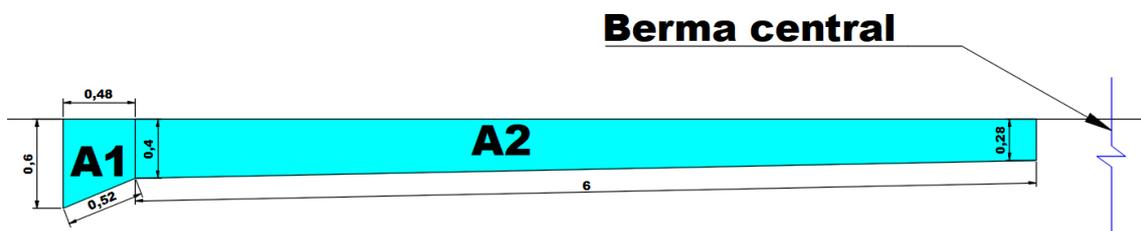


Tabla 19

Cálculos capacidad de calle tramo 1 – 4

Capacidad de calle tramo 1 – 4		
A1	0.240	m ²
A2	2.040	m ²
Atotal	2.280	m ²
S	0.022	
perímetro	7.4	m
Rh	0.308	m
n	0.016	
Q/2	9.642	m ³ /s
Q	19.28	m ³ /s

Figura 40

Sección transversal av. Hoyos Rubio tramo 5 – 10

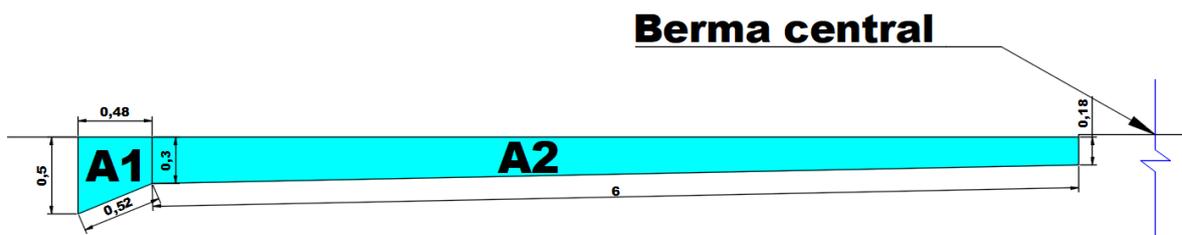


Tabla 20

Cálculos capacidad de calle tramo 5 - 10

Capacidad hidráulica tramo 5 – 10		
A1	0.192	m2
A2	1.440	m2
Atotal	1.632	m2
S	0.020	
perímetro	7.2	m
Rh	0.227	m
n	0.016	
Q/2	5.363	m3/s
Q	10.73	m3/s

Figura 41

Sección transversal av. Hoyos Rubio tramo 11 – 14

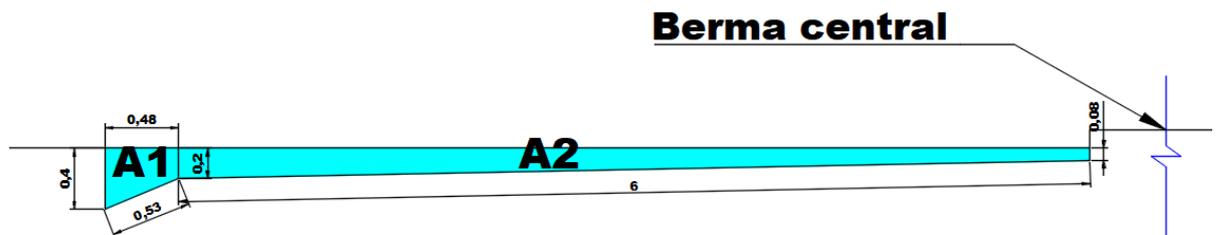


Tabla 21

Cálculos capacidad de calle tramo 11 - 14

Capacidad hidráulica tramo 11 – 14		
A1	0.144	m2
A2	0.840	m2
Atotal	0.984	m2
S	0.025	
perímetro	7.01	m
Rh	0.140	m
n	0.016	
Q/2	2.626	m3/s
Q	5.25	m3/s

Figura 42

Sección transversal av. Hoyos Rubio tramo 15 – 18

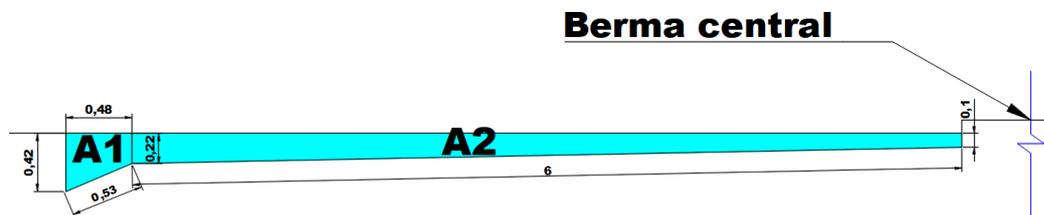


Tabla 22

Cálculos capacidad de calle tramo 15 - 18

Capacidad hidráulica tramo 15 – 18		
A1	0.154	m ²
A2	0.960	m ²
Atotal	1.114	m ²
S	0.020	
perímetro	7.05	m
Rh	0.158	m
n	0.016	
Q/2	2.876	m ³ /s
Q	5.75	m ³ /s

Comparación de la capacidad de calle con el caudal pico, con tiempo de retorno de 25 años

Tabla 23

Resumen comparación de la capacidad de calle con el caudal pico

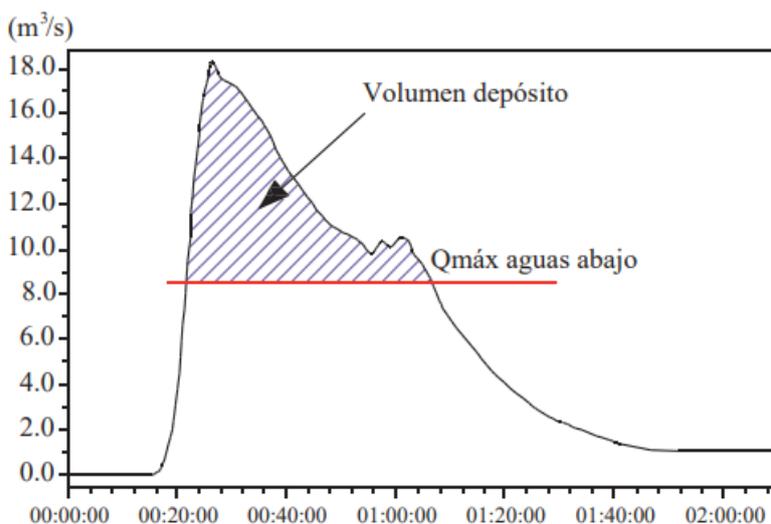
Calles	Capacidad de calle (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
Tramo 1 – 4	19.28	3.84
Tramo 5 – 8	10.73	3.20
Tramo 9 – 10	10.73	4.10
Tramo 11 – 12	5.25	4.40
Tramo 13 – 14	5.25	5.97
Tramo 15 – 16	5.75	5.80
Tramo 17 – 18	5.75	5.85

El tanque de retención deberá ubicarse antes de la cuadra 14 de la Av. Hoyos Rubio, debido a que el caudal supera a la capacidad hidráulica en las cuadras 14 hasta la cuadra 16.

Para determinar el volumen de almacenamiento del tanque de retención, utilizamos la Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano, (Ministerio de Ambiente, España, 2009). señala que uno de los métodos para calcular el volumen de un depósito es a través del cálculo gráfico del área delimitada por el hidrograma permite determinar el volumen del depósito. Este método implica la representación gráfica del hidrograma de entrada y, posteriormente, el trazado de una línea horizontal que indique el caudal máximo que la red aguas abajo puede admitir, el cual se considera el caudal constante de salida del depósito. Finalmente, se cuantifica el volumen representado por el área entre el hidrograma de entrada y esta línea horizontal, lo que corresponde al volumen necesario del depósito.

Figura 43

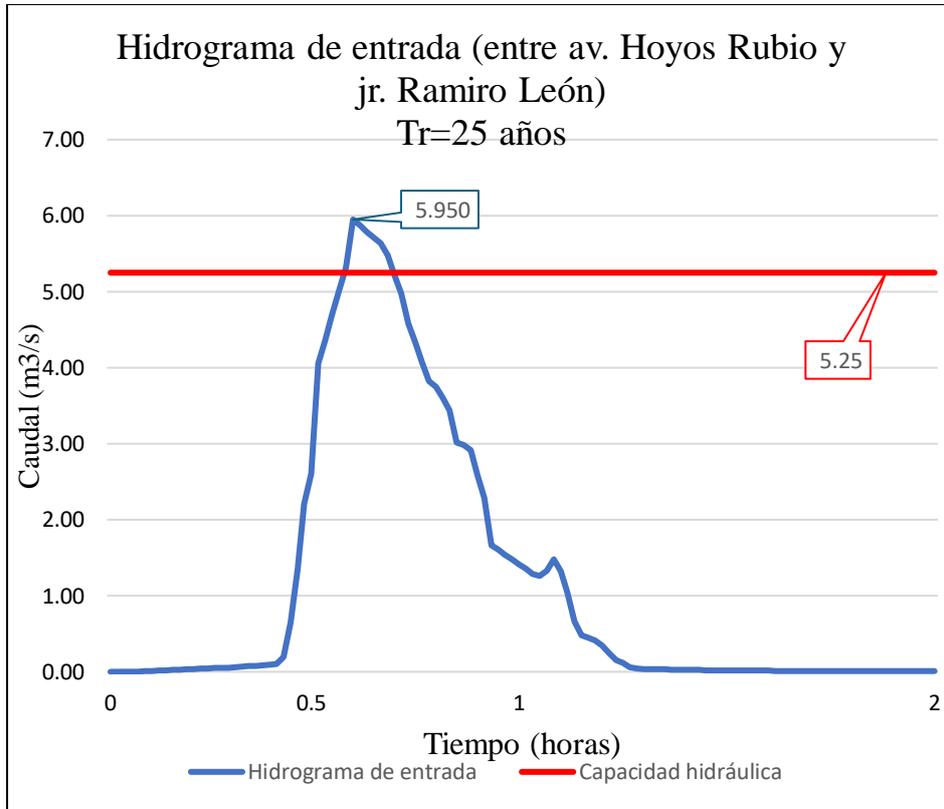
Estimación rápida del volumen de un depósito por diferencia con el máximo caudal



Entonces, el hidrograma de entrada lo obtenemos de nuestro modelo en el software SWMM 5.2., exportamos los valores a Excel y trazamos la recta.

Figura 44

Cálculo del volumen de un depósito por diferencia con el máximo caudal



Al calcular el área entre el hidrograma y la recta tenemos, un volumen de 178.23 m³

Dimensiones del tanque de retención para un volumen de 178.23 m³

Alto: 1.95 m

Ancho: 4.20 m

Largo: 21.77 m

Cálculo de capacidad de otras calles

Jirón Los Gorriones

Figura 45

Sección transversal jr. Los Gorriones

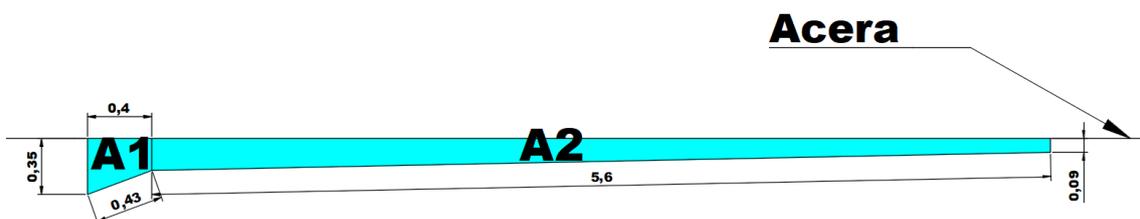


Tabla 24

Cálculos capacidad de calle jirón Los Gorriones

Capacidad hidráulica jirón Los Gorriones		
A1	0.110	m2
A2	0.812	m2
A total	0.922	m2
S	0.020	
Perímetro m	6.47	m
Rh	0.143	m
n	0.016	
Q	2.223	m3/s

Jirón Alfredo Rocha

Figura 46

Sección transversal jr. Alfredo Rocha tramo 1 - 2

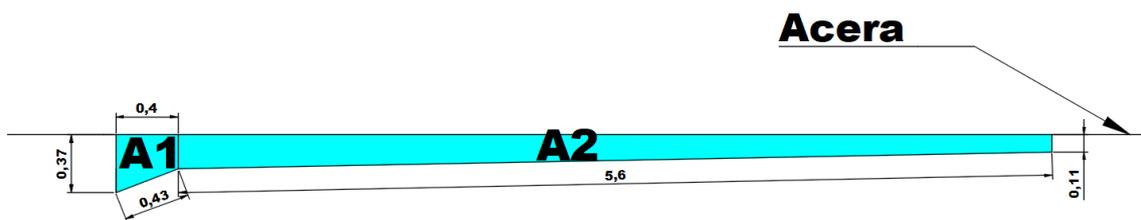


Tabla 25

Cálculos capacidad de calle jirón Alfredo Rocha tramo 1 - 2

Capacidad hidráulica jirón Alfredo Rocha tramo 1 - 2		
A1	0.118	m2
A2	0.924	m2
Atotal	1.042	m2
S	0.020	
Perímetro m	6.51	m
Rh	0.160	m
n	0.016	
Q	2.715	m3/s

Figura 47

Sección transversal jr. Alfredo Rocha tramo 3 - 4

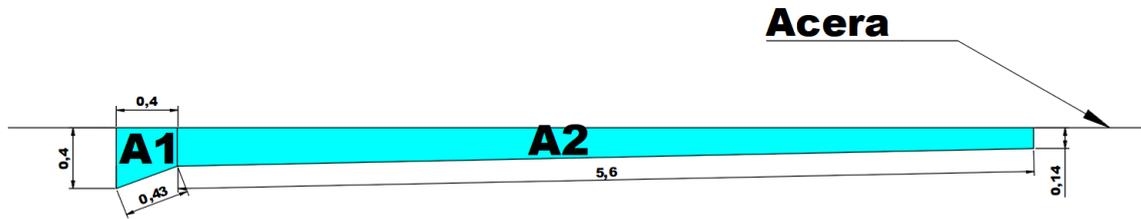


Tabla 26

Cálculos capacidad de calle jirón Alfredo Rocha tramo 3 - 4

Capacidad hidráulica jirón Alfredo Rocha tramo 3-4		
A1	0.130	m ²
A2	1.092	m ²
Atotal	1.222	m ²
S	0.020	
Perimetro m	6.57	m
Rh	0.186	m
n	0.016	
Q	3.519	m ³ /s

Comparación de la capacidad de calle con el caudal pico, con tiempo de retorno de 25 años

Tabla 27

Resumen comparación de la capacidad de calle con el caudal pico

Calles	Capacidad de calle (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
Jr. Los Gorriones	2.22	2.89
Jr. Alfredo rocha tramo 1 – 2	2.72	2.91
Jr. Alfredo rocha tramo 3 – 4	3.52	3.88

3.8.3.4. Modelación de los SUDS en SWMM

El primer paso en la modelación de los LID consiste en definir su configuración estándar en capas verticales para una unidad de área, lo cual permite caracterizar su

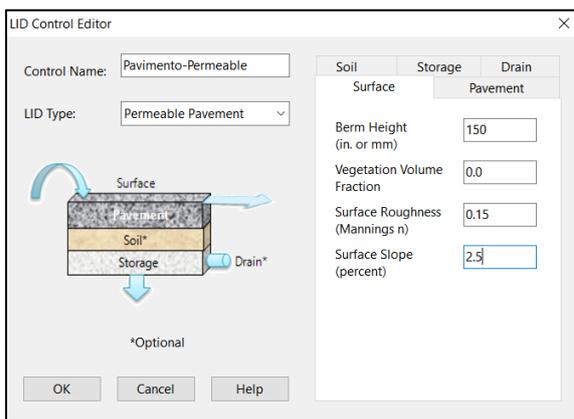
comportamiento hidráulico. Seguidamente, se detalla el procedimiento y las propiedades consideradas en el modelo para representar diferentes tipos de estructuras como alcorques inundables, pavimentos permeables y jardines filtrantes. Para configurar cada tipo de LID en el modelo, se emplea la herramienta “LID controls” dentro del apartado de hidrología, donde se establecen las propiedades específicas necesarias para cada estructura.

3.8.3.4.1. Sistema 01: Pavimentos permeables

Las estructuras de pavimentos permeables se configuran de forma semejante a los alcorques mediante la herramienta "LID Control Editor". Al elegir este tipo de pavimento, se define una composición de hasta cinco capas: superficie, capa de pavimento, suelo (opcional), almacenamiento y sistema de drenaje. En la pestaña correspondiente a la superficie, se deben ingresar datos como la altura del bordillo (fijada en 150 mm), el porcentaje cubierto por vegetación, el coeficiente de rugosidad del pavimento poroso y la pendiente del terreno.

Figura 48

Parámetros LID, Superficie - Pavimento poroso

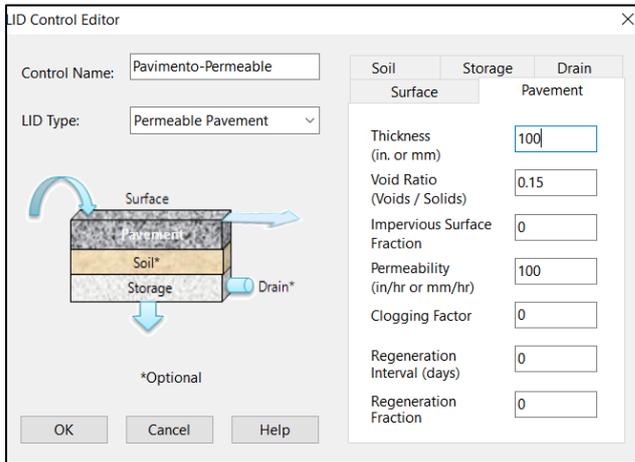


A continuación, en la segunda pestaña correspondiente al pavimento, se establece un espesor habitual que oscila entre 100 y 150 mm, con una proporción de vacíos que va del 12% al 21%. En esta sección se especifica la fracción impermeable de la superficie, la permeabilidad de la capa y el coeficiente de capacidad estructural. La pestaña de suelo,

si bien es opcional, depende del diseño adoptado para el pavimento permeable. En el caso particular de este estudio, no se considera una capa intermedia de suelo.

Figura 49

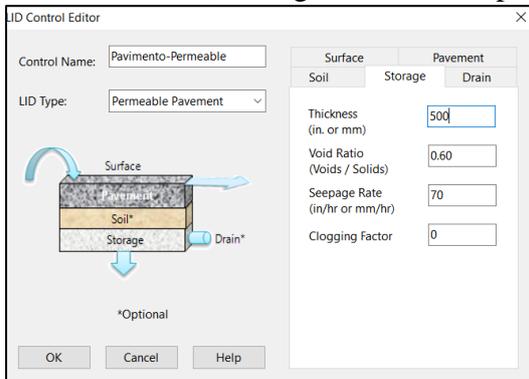
Parámetros LID, Pavimento - Pavimento poroso



De igual manera, la capa de almacenamiento se conforma por un volumen de material poroso —como grava o arena— situado en la base del pavimento, cuya función es retener el volumen correspondiente al tratamiento de escorrentías. Para su diseño, se definió una altura total de 500 mm, siguiendo los lineamientos establecidos por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (2016). Además, se consideró una relación de vacíos del 60%, una tasa de infiltración de 70 mm/h y un factor de obstrucción igual a cero.

Figura 50

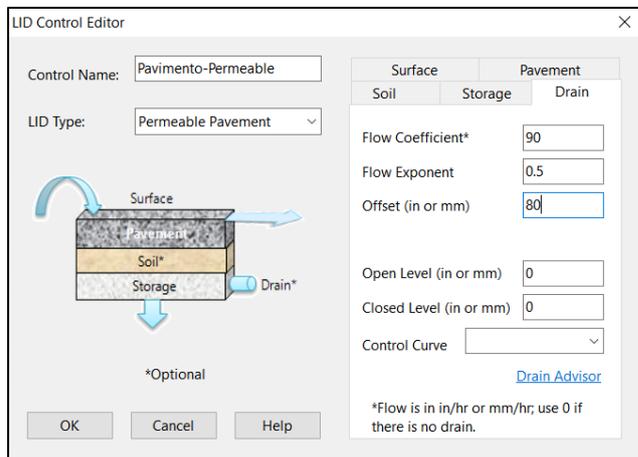
Parámetros LID, Storage - Pavimento poroso



Por último, el coeficiente de flujo representa el porcentaje máximo del agua recogida por el pavimento que se espera dirigir hacia el sistema de descarga, mientras que la porción restante se infiltrará en el terreno. El exponente de flujo suele fijarse en 0.5 cuando se trata de un orificio de descarga, como en el caso de la salida del sistema de pavimento. En cuanto a la altura de compensación (*offset height*), esta indica la distancia desde la base del sistema hasta el punto donde se sitúa el drenaje, es de 80 mm.

Figura 51

Parámetros LID, Superficie - Pavimento poroso

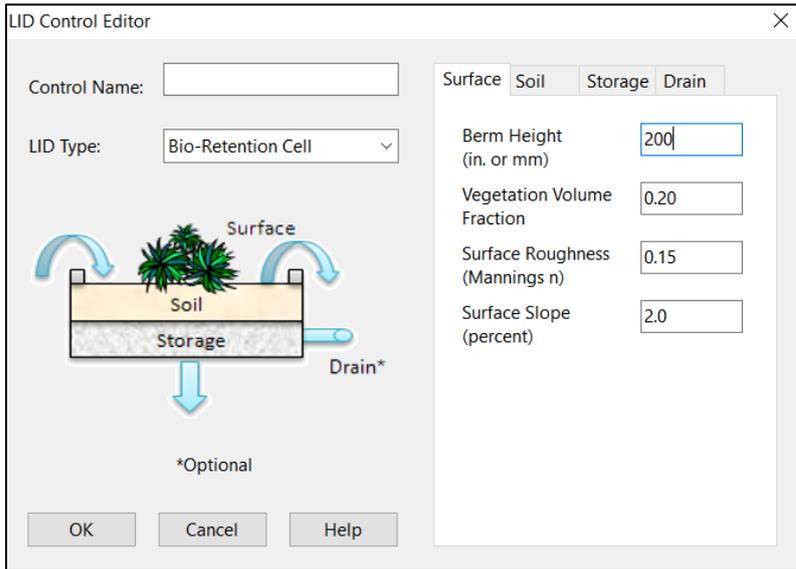


3.8.3.4.2. Sistema 02: Jardines Filtrantes

En el software SWMM, los jardines filtrantes se representan como celdas de biorretención, las cuales requieren información sobre la superficie, la capa de suelo, el volumen de almacenamiento y el sistema de drenaje. Para la capa superficial del alcorque, es necesario especificar la profundidad máxima de acumulación de agua, la proporción del volumen cubierta por vegetación, el coeficiente de rugosidad y la pendiente del terreno. El diseño estándar adoptado para el área de estudio contempla una profundidad máxima de encharcamiento de 200 mm, mientras que los valores de rugosidad y cobertura vegetal fueron definidos conforme a las directrices del programa SWMM.

Figura 52

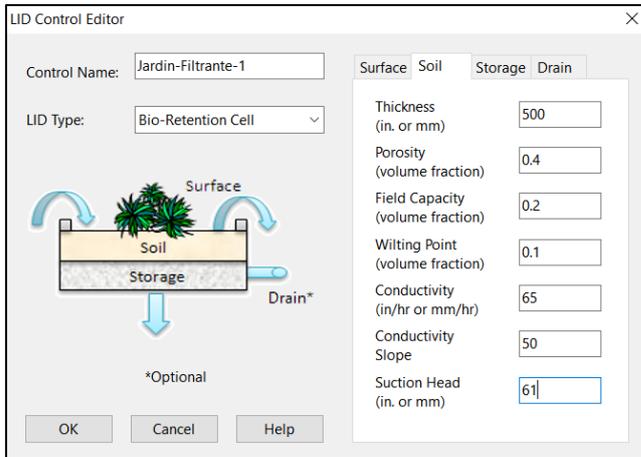
Parámetros LID, Superficie de los jardines filtrantes



La siguiente pestaña para configurar corresponde a la capa de suelo filtrante del jardín, compuesta por una mezcla de materiales destinada a tratar el agua mediante filtración, dirigiéndola hacia las capas subyacentes de almacenamiento y drenaje. Esta capa fue diseñada con un espesor de 500 mm, una porosidad del 40% y una conductividad hidráulica de 65 mm/h, conforme a las directrices del Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), (2016). Los valores asignados a la pendiente de conductividad y a la succión se obtuvieron del manual del SWMM. La pendiente de conductividad varía entre 30 y 60 y puede calcularse a partir de la granulometría del suelo con la fórmula: $0.48(\% \text{ de arena}) + 0.85(\% \text{ de finos})$, mientras que el valor de succión recomendado para arena arcillosa es de 2.4 pulgadas (equivalente a 61 mm).

Figura 53

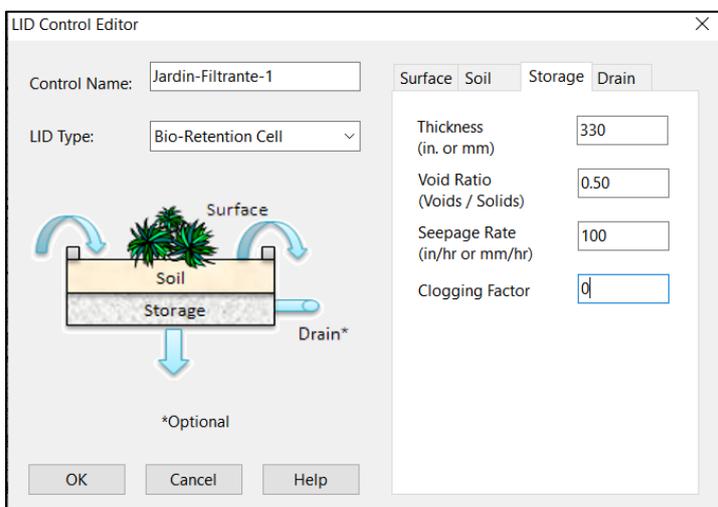
Parámetros LID, suelo filtrante del jardín



La tercera pestaña en la configuración de los jardines filtrantes en SWMM hace referencia a la capa de almacenamiento, la cual fue diseñada con una profundidad total de 330 mm, una porosidad del 50% y una tasa de infiltración de 100 mm/h, tal como se detalla en la figura siguiente. El factor de colmatación —parámetro que refleja la reducción de la capacidad de almacenamiento a lo largo del tiempo debido a la acumulación de sedimentos y que sirve para programar tareas de mantenimiento— se fijó en cero, ya que este aspecto no se contempla dentro del alcance de la modelación desarrollada.

Figura 54

Parámetros LID, capa de almacenamiento del jardín filtrante



Seguidamente, los parámetros relacionados con el drenaje del alcorque fueron definidos conforme a las directrices del manual de SWMM. El coeficiente de flujo representa el porcentaje máximo del volumen de agua recogido por el alcorque que se prevé evacuar hacia el sistema de descarga. Por su parte, el exponente de flujo puede asignarse con un valor de 0.5 si se trata de un orificio de salida, o bien calcularse mediante una fórmula que toma en cuenta el tiempo de vaciado y la profundidad máxima de agua sobre la tubería de drenaje del alcorque.

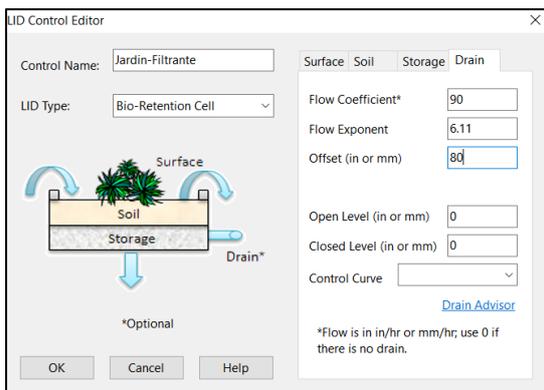
$$Flow\ exponent = \frac{2 * (Prof.\ máxima(mm))^{1/2}}{Tiempo\ de\ drenaje\ (horas)}$$

$$Flow\ exponent = \frac{2 * (1130)^{1/2}}{11} = 6.11$$

Posteriormente, el parámetro denominado *offset height* hace referencia a la distancia vertical entre el fondo del alcorque y la ubicación del sistema de drenaje, la cual, según lo definido en el diseño, es de 80 mm.

Figura 55

Parámetros LID, drenaje del jardín filtrante



3.8.3.5. Asignación de los LID a las subcuencas de drenaje en SWMM

La vinculación de las estructuras LID a las áreas de drenaje se lleva a cabo dentro de las propiedades de cada cuenca, a través de la función "LID controls". Dependiendo del

diseño de cada tipo de estructura, se puede establecer una configuración predeterminada y la cantidad de unidades que se distribuirán en la cuenca, o bien indicar que la totalidad de la cuenca está compuesta por una estructura LID específica. Para las configuraciones estándar, se define el ancho de la superficie, la saturación inicial del suelo y la proporción del área impermeable que está siendo tratada. Adicionalmente, se especifica el punto de descarga de la estructura.

3.8.3.6. Planteamiento y dimensionamiento del sistema de drenaje para los SUDS

3.8.3.6.1. Caudal que filtran al dren subterráneo

Debido a que los SUDS no deben filtrar el agua al suelo, para impedir que malogre las cimentaciones de las estructuras cercanas, los sistemas: Jardines Filtrantes y Pavimentos Permeables), deben tener una geomembrana para impedir el paso del agua. Entonces, el agua filtrada por las capas de los tres sistemas planteados irá a través de una tubería hacia una estación de bombeo.

3.8.3.6.2. Dimensionamiento

El dimensionamiento se realizó, teniendo en cuenta los hietogramas para el periodo de retorno de 25 años.

Estación de bombeo para jardines filtrantes

Jardín Filtrante	Q (litros/segundo)
A1	1.60
A2	1.60
A3	1.60
A4	8.60
A5	9.80
A6	4.00
A7	3.80
A8	1.60
A9	0.80
A10	0.80
A11	0.80
A12	1.60
A13	1.60
A14	1.60
A15	0.80

Al final del colector tendremos un caudal, para jardines filtrantes, de 40.60 litros/segundo. Planteamos un colector de 8" y tenemos una velocidad aceptable de 1.25 m/s, según la guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano (Ministerio de medio ambiente, España, 2009), La capacidad total del depósito de bombeo se calcula mediante la adición del volumen operativo y el volumen inactivo, siendo este último definido por la elevación de la toma de aspiración. El volumen operativo corresponde al espacio de almacenamiento de la cámara de aspiración, comprendido entre el nivel superior de activación de las bombas (inmediatamente inferior al conducto de entrada) y el nivel inferior de desactivación (situado en la parte superior del cuerpo de la bomba).

$$V = (n - n_r) \frac{900Q_b}{N_a}$$

V: Capacidad mínima requerida del pozo de bombeo (en metros cúbicos)

n: Cantidad total de bombas instaladas en el sistema

n_r: Número de bombas disponibles como respaldo o para situaciones de alta demanda

Q_b: Tasa de flujo que puede impulsar cada bomba individualmente (m³/s)

N_a: Frecuencia de encendido permitida por hora (8/hora para bombas <37 kW)

Además, el caudal unitario de cada bomba debe ser mayor o igual al caudal de entrada a la estación de bombeo dividido entre número de bombas instaladas menos el número de bombas en reserva

Se planteó dos bombas instaladas, siendo una de ellas de reserva, y un caudal unitario de cada bomba de 50 litros/segundo, mayor al caudal de entrada a la estación de bombeo.

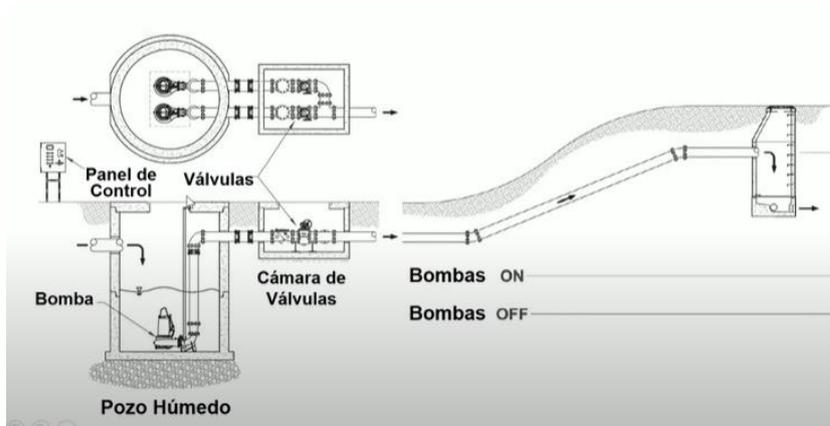
$$V = (2 - 1) \frac{900(0.05)}{8}$$

$$V = 5.63 \text{ m}^3$$

El esquema que se utilizó es el de bombas sumergibles, solo con pozo húmedo

Figura 56

Elevación de aguas pluviales, solo con pozo húmedo



Luego, se evacua el agua de la estación de bombeo mediante un tubo de impulsión hacia un buzón, en una cota superior donde continua su evacuación hacia el río Mashcon.

Se sugiere que la rapidez del flujo de agua dentro de la tubería de impulsión de cada bomba no exceda los 3 metros por segundo. Adicionalmente, se aconseja que la velocidad mínima no sea menor a 0.6 o 0.7 metros por segundo, generalmente, para prevenir la acumulación de sedimentos en la tubería. En la zona de descarga de las bombas, se establece una velocidad mínima de 1.00 metro por segundo para evitar obstrucciones en el rotor.

El dimensionamiento del conducto de impulsión puede realizarse mediante una fórmula particular, y posteriormente se elige el diámetro estándar disponible en el mercado que más se aproxime al resultado obtenido con dicha expresión:

$$D = 1.128 \sqrt{\frac{Q_b}{V}}$$

D: Diámetro (m)

Qb: Caudal (m³/s)

V: Velocidad (m/s)

Se utilizó el caudal de la bomba de 110 litros/segundo y una velocidad de 2.5 m/s

$$D = 1.128 \sqrt{\frac{0.11}{2.55}} = 0.24 \text{ m}$$

Estación de bombeo para pavimentos permeables

Pavimentos	Q (litros/segundo)
P1	1.67
P2	1.67
P3	5.00
P4	16.67
P5	20.00
P6	6.67
P7	6.67
P8	3.33
P9	1.67
P10	1.67
P11	1.67
P12	3.33
P13	3.33
P14	3.33
P15	1.67

Utilizando de igual manera los pasos para la estación de bombeo para jardines filtrantes,

se obtuvo los siguientes resultados.

Estación de bombeo – pavimentos permeables		
Caudal entrada	78.33	l/s
Diámetro	8.00	pulgadas
Velocidad	2.42	m/s
Caudal de salida	100.00	l/s
numero de bombas	2.00	
arranques/h	8.00	
V	11.25	m ³
Tubería de impulsión	0.21	m

Estación de bombeo para tanque de retención

Para el tanque de retención, con un volumen de 178.27 m³, mediante la ecuación para flujo a través de un orificio, con un coeficiente de descarga de 0.60 y con un diámetro de salida de 8" se calculó el caudal de salida.

$$Q = C_d * A * \sqrt{2 * g * h}$$

$$Q = 0.60 * 0.03 * \sqrt{2 * 9.81 * 1.75}$$

$$Q = 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

Utilizando de igual manera los pasos para la estación de bombeo para jardines filtrantes, se obtuvo los siguientes resultados.

Estación de bombeo tanque de retención		
Caudal entrada	110.00	l/s
Diámetro	8.00	pulgadas
Velocidad	3.39	m/s
Caudal de salida	120.00	l/s
numero de bombas	2.00	
arranques/h	8.00	
V	13.50	m ³
Tubería impulsión	0.23	m

Las estaciones bombeo evacuaran de manera controlada a un buzón en una cota superior, en donde cambiara su dirección, orientando su evacuación hacia el río Mashcon,

3.9. Presentación de resultados

3.9.1. Resumen de las tipologías SUDS

Tabla 28

Resumen de tipologías SUDS

Tipo de SUDS	Cantidad	Área (m ²)
Jardines Filtrantes	15.00	894.02
Pavimentos permeables	47.00	940
Tanque de retención	1.00	91.43

3.9.2. Hidrogramas del sistema de drenaje urbano con y sin SUDS

Teniendo modelada la zona de investigación, se obtuvo los caudales de descarga en el punto de descarga (outfall), el programa SWMM nos permite exportar los datos Excel y se obtuvo los siguientes resultados:

Figura 57

Hidrogramas en el punto de descarga entre av. Hoyos Rubio y jr. Armando Revoredo

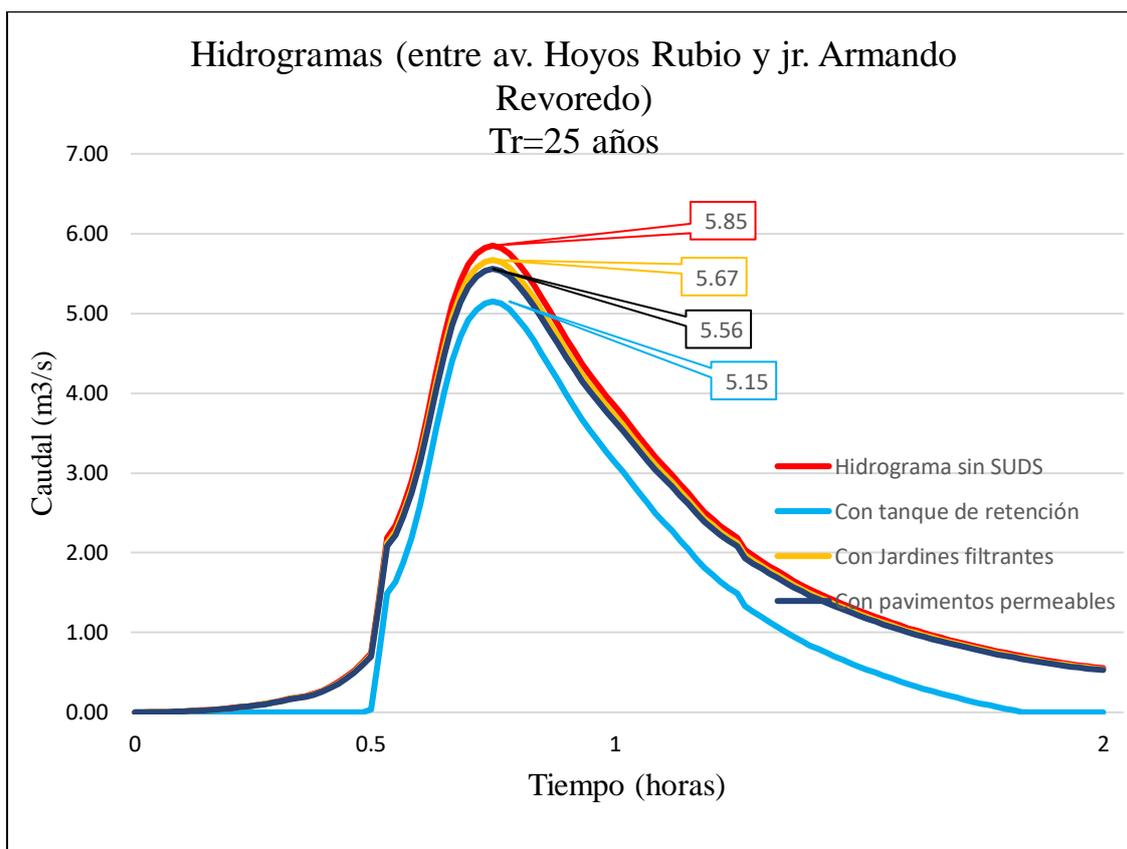


Tabla 29

Tabla comparativa de resultados obtenidos

Descripción	Caudal Pico (m ³ /s)	Variación (%)	Capacidad de calle (m ³ /s)
Sin SUDS	5.85	-	5.75
Con tanque de retención	5.15	-11.97	5.75
Con jardines filtrantes	5.67	-3.08	5.75
Con pavimentos permeables	5.56	-4.96	5.75

Figura 58

Hidrogramas en el punto de descarga jr. Los Gorriones

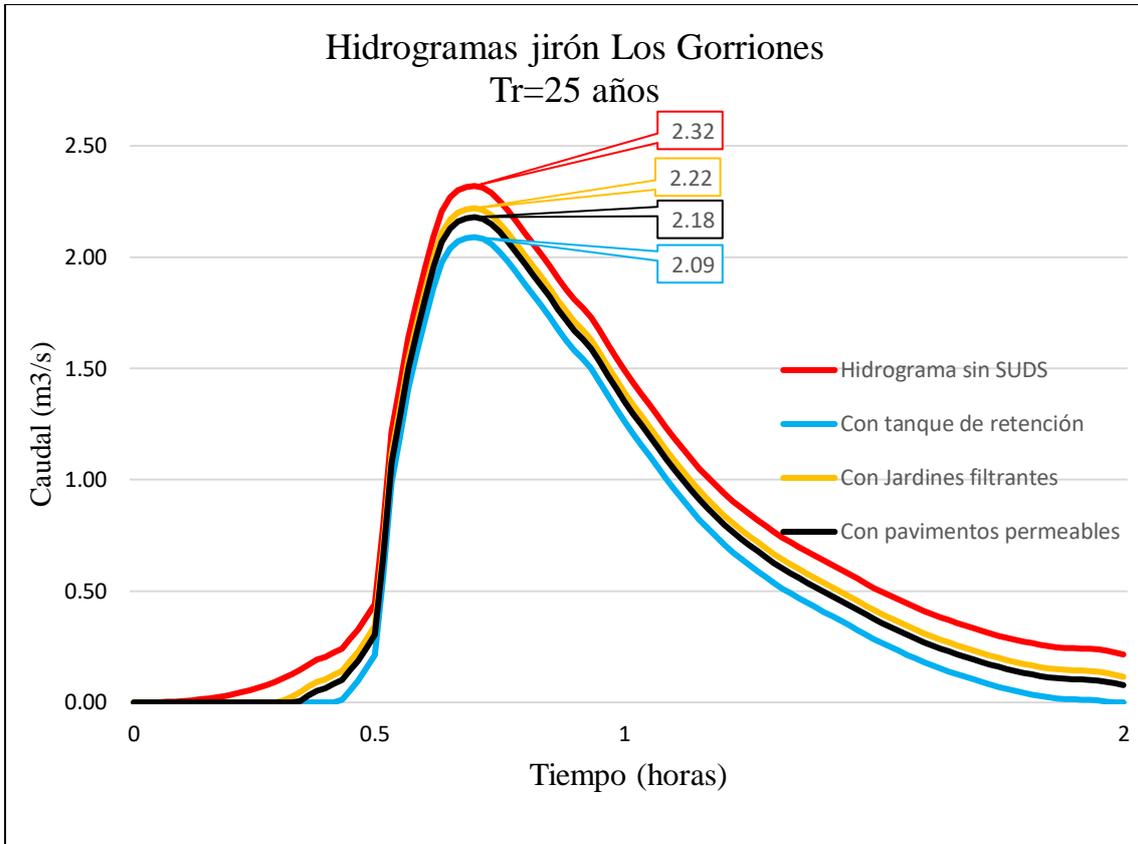


Tabla 30

Tabla comparativa de resultados obtenidos

Descripción	Caudal Pico (m³/s)	Variación (%)	Capacidad de calle (m³/s)
Sin SUDS	2.32	-	2.22
Con tanque de retención	2.09	-9.91	2.22
Con jardines filtrantes	2.22	-4.31	2.22
Con pavimentos permeables	2.18	-6.03	2.22

Figura 59

Hidrogramas jirón Alfredo Rocha tramo 1-2

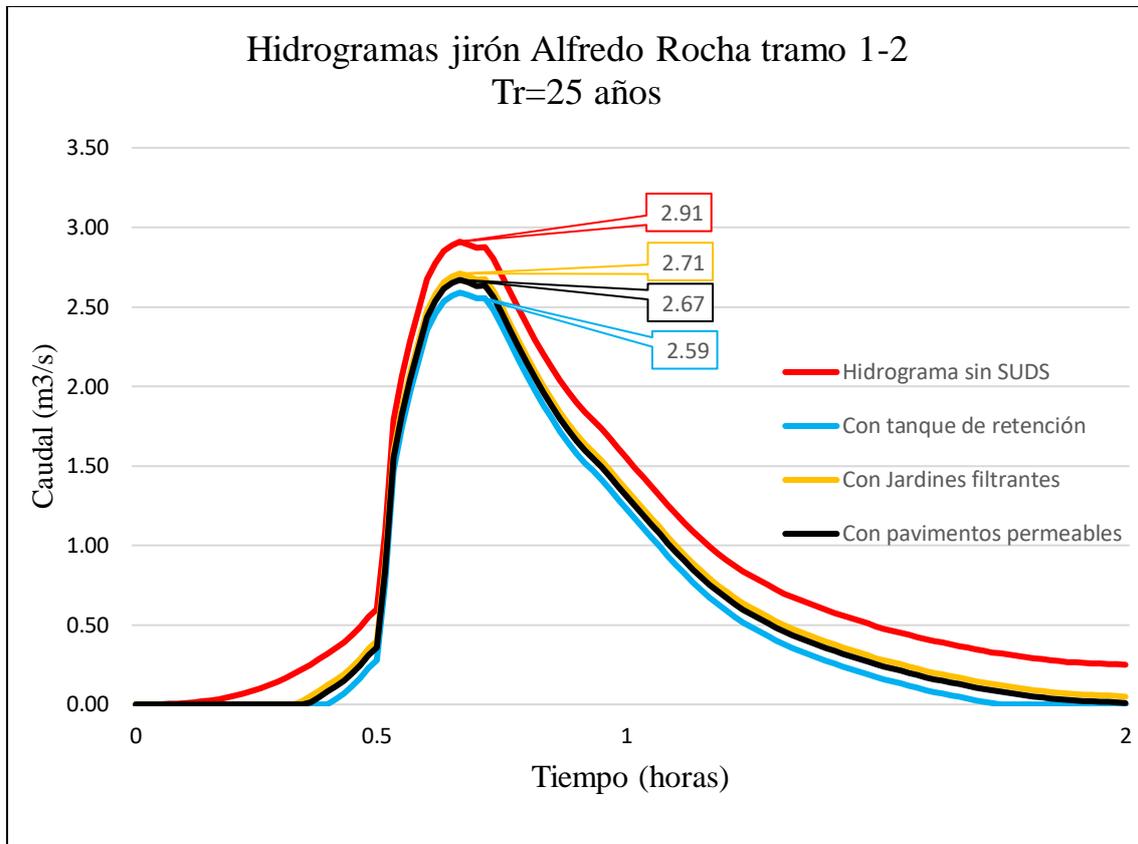


Tabla 31

Tabla comparativa de resultados obtenidos

Descripción	Caudal Pico (m3/s)	Variación (%)	Capacidad de calle (m3/s)
Sin SUDS	2.91	-	2.72
Con tanque de retención	2.59	-11.00	2.72
Con jardines filtrantes	2.71	-6.87	2.72
Con pavimentos permeables	2.67	-8.25	2.72

Figura 60

Hidrogramas jirón Alfredo Rocha tramo 3 - 4

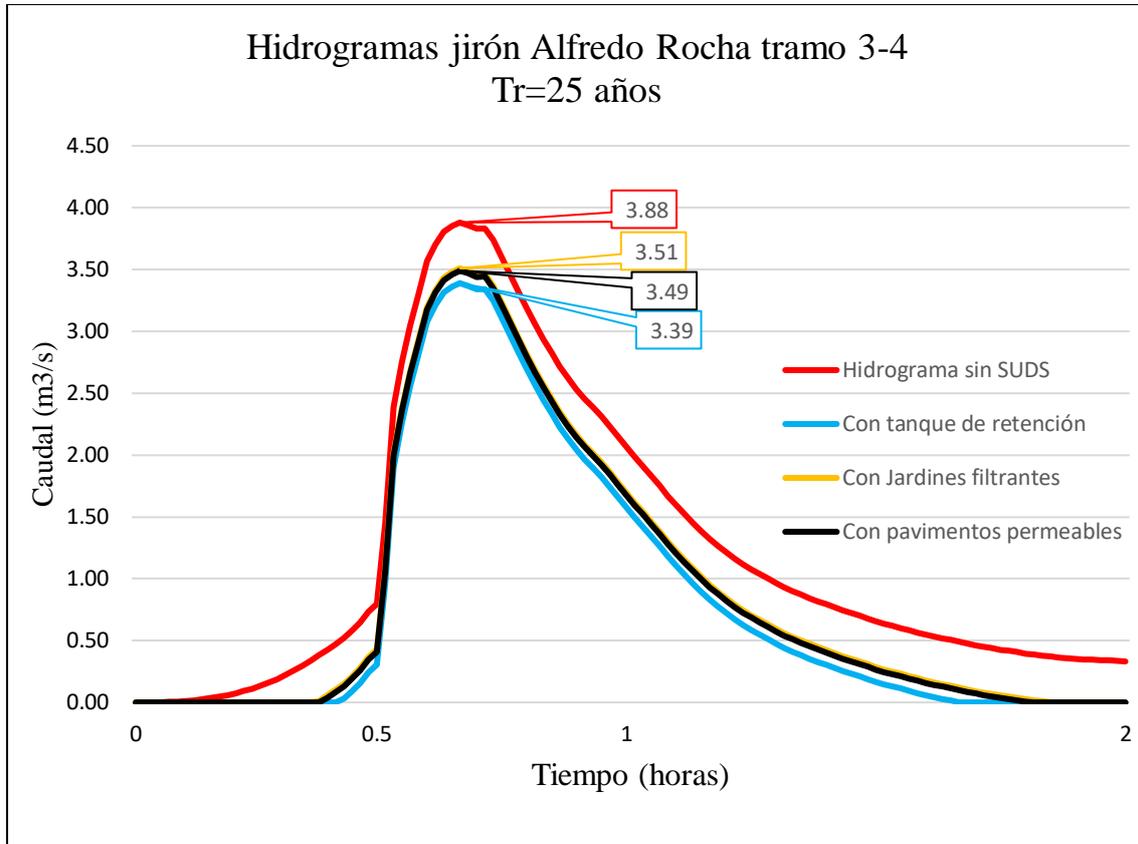


Tabla 32

Tabla comparativa de resultados obtenidos

Descripción	Caudal Pico (m3/s)	Variación (%)	Capacidad de calle (m3/s)
Sin SUDS	3.88	-	3.52
Con tanque de retención	3.39	-12.63	3.52
Con jardines filtrantes	3.51	-9.54	3.52
Con pavimentos permeables	3.49	-10.05	3.52

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la zona de investigación, el uso de suelo es principalmente residencial, la red de drenaje urbano existente usa las calles y cunetas como conductos de drenaje superficial, el 81.25% de las calzadas son de pavimento rígido y el 18.75% restante son calzadas sin pavimentar (solo afirmado).

Para el punto de descarga entre la avenida Hoyos Rubio y el jirón Armando Revoredo, la disminución más significativa del caudal de descarga para el periodo de retorno de 25 años se da con el tanque de retención -11.95% y la menos significativa se da con los jardines filtrantes -3.08%. Esto se replica en las demás calles con problemas de drenaje.

Los jardines filtrantes, cuentan con la posibilidad de albergar plantas medianas y pequeñas. Además, contribuyen al control de escorrentía con un volumen de tratamiento. Mientras que los pavimentos permeables, a pesar de que no cuentan con la posibilidad de albergar vegetación, disminuye mejor el caudal pico que los jardines filtrantes.

La implementación de SUDS es efectiva en la mitigación de inundaciones urbanas, destacando el tanque de retención como la mejor alternativa.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se determinó, que la zona de investigación cuenta con un área de 536,649.35 m² y tiene un uso de suelo mayormente residencial de densidad baja, media y alta. Corresponde a la parte baja de la ciudad y se encuentra en desarrollo teniendo el 81.25% de las calzadas de pavimento rígido, mientras que, el 18.75% restante sin pavimentar (solo afirmado). Esto facilita la escorrentía superficial, pero al mismo tiempo impide la infiltración y en consecuencia el aumento de los caudales máximos de escorrentía.
- Se analizó el sistema de drenaje actual, mediante el modelamiento en el software Storm Water Management Model (SWMM), utilizando el hietograma de lluvia de diseño para el periodo de retorno de 25 años, obteniendo 297 subcuencas que representan lotes y terrenos. Se incluyeron los datos geométricos de las subcuencas, como áreas, ancho de cuenca y porcentaje de área impermeable, además de los coeficientes de rugosidad de Manning para superficies permeables e impermeables. Se empleó el método de infiltración SCS Curve Number. El modelo también incluye 167 nodos que representan los puntos de drenaje de las subcuencas, cotas de conexiones obtenidas de planos topográficos, 230 conductos que simulan el drenaje superficial, 01 punto de descarga.
- Se diseñaron, 47 pavimentos permeables de 2.00 m de ancho y 10 m de largo que ocupan 940 m², 15 jardines filtrantes que ocupan 894.02 m² y un tanque de retención de 178.27 m³.
- Se simuló la implementación de tres sistemas de drenaje urbano sostenible (pavimentos permeables, jardines filtrantes y tanque de retención), obteniendo los caudales máximos, aplicando las 03 tipologías SUDS, y con periodo de retorno

de 25 años. Teniendo para el periodo de retorno 25 años la mayor variación de 11.97 %, en el punto de descarga, entre la av. Hoyos Rubio y el jr. Armando Revoredo y utilizando tanques de retención.

- Se construyó los hidrogramas, haciendo uso de los resultados de la simulación en SWMM 5.2, para el punto de descarga con el periodo de retorno de 25 años y para las 4 situaciones, sistema actual, con pavimentos permeables, con jardines filtrantes y con tanques de retención, pudiendo observar de manera grafica la disminución del caudal pico.
- Se determinó que el efecto de la implementación de tres sistemas de drenaje urbano sostenible (pavimentos permeables, jardines filtrantes y tanque de retención), en el caudal de descarga en la avenida Hoyos Rubio es la disminución de caudal pico en el punto de descarga y se dan mayores disminuciones al aplicar tanque de retención con un periodo de retorno de 25 años.
- Se concluye que estos sistemas de drenaje urbano sostenible deben estar conectados una estación de bombeo para su funcionamiento, y estos tanques deben liberar de manera controlada el agua almacenada, al rio Mashcon.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda proponer usos alternativos para el agua retenida en los tanques de retención, como riego urbano o limpieza de calles.
- Se recomienda, investigar la profundidad de lluvia (hp), para poder obtener mejores resultados en la determinación del volumen de calidad y en el dimensionamiento de los SUDS.
- Se recomienda estandarizar el modelo SWMM para el estudio de drenaje pluvial urbano, ya que es muy utilizado en diversos países desarrollados, en la que incluso hay congresos y foros internacionales con ponencias sobre el uso de este programa, en la cual se obtiene una mejor interpretación de la realidad que el tradicional método racional.
- Se recomienda aplicar esta metodología de diseño e implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en la planificación de nuevas vías urbanas. Y analizar si es factible o no incorporar estos sistemas desde las etapas iniciales del diseño, esto permitirá optimizar la gestión de aguas pluviales, reducir riesgos de inundación y mejorar la sostenibilidad de las infraestructuras urbanas. Además, la integración de SUDS en nuevas vías puede servir como modelo replicable para futuras intervenciones en otras zonas urbanas con características similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto Plascencia, C. A. (2017). *Evaluación del riesgo de inundación mediante modelo de gestión de aguas pluviales del sector sur de la ciudad de Cajamarca [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]*. Repositorio académico. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.14074/3327>
- Benjamin, J. R., & Cornell, C. A. (1970). *Probability, statistics and decision for civil engineers*. McGRAW-HILL.
- Bermúdez-Valero, M. L. (2021). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en América Latina: ¿Una solución basada en la naturaleza con criterio social? [Tesis para obtener el grado de maestro en gestión ambiental, Pontificia Universidad Javeriana de Colombia]*. Repositorio Institucional. doi:<https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.59039>
- Bertoni, J. C., Ambrosino, S., Barbeito, O., Ubaldo Paoli, C., Paoli, C. U., Serra, J. J., & Daniele, A. (2004). *Inundaciones urbanas en Argentina*. Instituto Nacional del agua, Argentina.
- Campos Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la Hidrología Urbana*. Editorial Universitaria Potosina.
- Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA). (2016). *Investigación de las tipologías y/o tecnologías de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C.* Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL.
- Cubides, E., & Santos, G. (julio-diciembre de 2018). Control de escorrentías urbanas mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de

infiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(24), 32-42.

doi:<http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3813>

Federal Interagency Stream Restoration Working Group. (1998). *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*.

Felipe-Obando, O., Gutierrez Lope, L., Lavado-Casimiro, W., Montesinos Cáceres, C. A., & Quijada Diaz, N. (2023). *Desarrollo de curvas pluviométricas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en Perú*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. Obtenido de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/2825>

García Castillo, Y. C., & Miranda Requena, M. R. (2021). *Diseño de drenaje pluvial en la cuenca Poder Judicial de la ciudad de Sullana usando el programa SWMM [Tesis de licenciatura, Universidad de Piura]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11042/5335>

Gómez Valentín, M. (2007). *Curso de hidrología urbana*. Universidad Politécnica de Cataluña.

Instituto Nacional de obras sanitarias de Venezuela. (1979). *Drenaje urbano*. Caracas.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (29 de julio de 2019). *Blog: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/imta/articulos/la-importancia-de-la-medicion-del-agua-de-lluvia>

Lezama Tisnado, S. J., & Rodríguez De La Sota, M. M. (2020). *Una revisión de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) aplicados a nivel mundial [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/56412>

- Marsalek, J., Jimenez Cisneros, B., Karamouz, M., Malmquist, P.-A., Goldenfum, J. A., & Chocat, B. (2007). *Urban Water Cycle Processes and Interactions*. CRC Press.
- Medina Piza, D. L., Aguilar Rojas, L. Y., & Calderon Gomez, A. (2018). *Análisis comparativo de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) caso de estudio carretera 4 y carretera 5 entre calles 68 y 71, sector Chapinero Alto, Bogotá, Colombia. [Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10983/22379>
- Merlo Romero, V., & Soto Pedrera, G. (2020). *Análisis del sistema de drenaje urbano en base a estudios de nivel internacional y su relación al sistema de drenaje en la ciudad de Cajamarca 2020 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/28623>
- Ministerio de medio ambiente, España. (2009). *Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano*. Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX).
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2012). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje*. Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2021). *Norma OS.060 Drenaje Pluvial Urbano*. Lima: El Peruano.
- Ministerio para la transición ecológica. (2019). *Guías de adaptación al riesgo de inundación: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Gobierno de España.
- Municipalidad Provincial de Cajamarca. (2022). *Reglamento del Plan de Desarrollo Urbano de Cajamarca 2016-2026*. Desarrollo Urbano y Territorial.
- Palacios Ruiz, A. (2004). *Acueductos, cloacas y drenajes*. Caracas, Venezuela: Publicaciones Universidad Católica Andrés Bello.

- Perales Momparler, S., & Andrés Doménech, I. (2008). Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible: Una Alternativa a la Gestión del Agua de Lluvia. *Retema: Revista técnica de medio ambiente*, 21(124), 92-104. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/237213737_Los_Sistemas_Urbanos_de_Drenaje_Sostenible_Una_Alternativa_a_la_Gestion_del_Agua_de_Lluvia
- Rojas Vasquez, D. R. (2021). *Sistema de drenaje urbano sostenible entre la Av. Nuevo Cajamarca y Jr. Yurimagyas, Cajamarca 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad privada del norte]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/30002>
- SENAMHI. (06 de junio de 2022). *Pronóstico del tiempo SENAMHI*. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=cajamarca&p=pronostico-detalle>
- Soriano Martínez, L. (2015). *Indicadores de sostenibilidad de la gestión integral de las aguas de lluvia en los entornos urbanos: Aplicación a la ciudad de Zaragoza. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]*. Repositorio Institucional. doi:<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.38474>
- Tarrillo Vásquez, L. G. (2023). *Evaluación del sistema de drenaje sobre el pavimento del Jirón Los Sauces urbanización el Ingenio-Cajamarca [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5715>
- Ticahuanca Mamani, J. (2022). *Diseño de un sistema de drenaje pluvial sostenible en dos asociaciones de vivienda del distrito Gregorio Albarracín, Tacna, 2022 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12969/2469>
- Universidad Politécnica de Valencia. (23 de octubre de 2010). Obtenido de <http://www.instagua.upv.es/swmm/intro.htm>

APÉNDICES

- APÉNDICE A** **Panel fotográfico del problema**
- APÉNDICE B** **Parámetros de ingreso al modelo SWMM 5.2**
- APÉNDICE C** **Planos**

APÉNDICE A

PANEL FOTOGRAFICO DEL PROBLEMA

Fotografía A.1

Escorrentía superficial en la zona de investigación



Nota. Capturada en octubre 2022.

Fotografía A.2

Escorrentía superficial en la zona de investigación



Nota. Capturada en octubre 2022.

Fotografía A.3

Escorrentía superficial en la zona de investigación



Nota. Capturada en octubre 2022.

Fotografía A.4

Escorrentía superficial en la zona de investigación



Nota. Capturada en octubre 2022.

APÉNDICE B

PARÁMETROS DE INGRESO AL MODELO SWMM 5.2

PARÁMETROS DE LAS SUBCUENCAS URBANAS

Nombre	Outlet	Área (ha)	%Imper	Ancho (m)	%Pendiente
Sc-1	nodo-1	1.0560	81.46	104.32	9.81
Sc-2	nodo-2	0.5733	93.56	57.02	7.90
Sc-3	nodo-2	0.7737	10.01	160.85	7.95
Sc-4	nodo-4	1.2026	60.65	99.77	3.93
Sc-5	nodo-47	0.7975	70.01	59.96	2.21
Sc-6	nodo-3	1.3090	14.20	85.29	3.56
Sc-7	nodo-9	1.6347	0.00	104.11	4.82
Sc-8	nodo-14	1.0482	6.97	129.67	4.71
Sc-9	nodo-19	0.1398	88.48	39.34	14.07
Sc-10	nodo-21	0.1332	100.00	38.33	3.07
Sc-11	nodo-9	0.7652	53.01	119.05	4.95
Sc-12	nodo-11	0.2087	80.46	40.95	5.71
Sc-13	nodo-163	1.4444	64.41	92.01	3.94
Sc-14	nodo-161	1.8251	8.89	102.70	4.73
Sc-15	nodo-17	0.7664	53.20	118.36	5.51
Sc-16	nodo-162	1.5216	60.32	117.69	3.40
Sc-17	nodo-16	0.3573	66.88	40.71	4.61
Sc-18	nodo-22	0.2392	99.11	53.58	4.41
Sc-19	nodo-24	0.3114	91.43	52.42	5.54
Sc-20	nodo-21	0.1804	98.93	22.64	10.91
Sc-21	nodo-12	0.1645	64.66	26.91	11.55
Sc-22	nodo-11	0.0913	100.00	19.54	2.98
Sc-23	nodo-12	0.0937	91.94	18.84	3.33
Sc-24	nodo-12	0.0934	85.84	24.37	10.29
Sc-25	nodo-13	0.1290	92.80	24.01	7.96
Sc-26	nodo-27	0.1240	100.00	35.68	7.93
Sc-27	nodo-33	0.1689	86.08	55.71	5.99
Sc-28	nodo-29	0.1344	100.00	33.84	7.59
Sc-29	nodo-33	0.2157	89.58	57.66	10.80
Sc-30	nodo-16	0.2337	81.82	47.99	5.93
Sc-31	nodo-36	0.1313	85.46	25.89	2.83
Sc-32	nodo-32	0.1149	84.32	57.56	5.52
Sc-33	nodo-37	0.1432	67.67	56.17	3.17
Sc-34	nodo-16	0.2892	50.39	45.93	4.83
Sc-35	nodo-38	0.4295	2.36	89.88	2.68
Sc-36	nodo-166	0.5436	81.15	55.66	4.94
Sc-37	nodo-39	0.7576	90.53	69.06	4.32
Sc-38	nodo-37	0.3345	66.59	38.00	4.95
Sc-39	nodo-42	0.3141	54.14	33.63	6.97
Sc-40	nodo-40	0.3207	60.30	46.88	3.03
Sc-41	nodo-43	0.4278	14.79	52.46	4.27
Sc-42	nodo-41	0.3858	78.01	47.76	3.62
Sc-43	nodo-44	0.3819	88.89	51.14	3.11
Sc-44	nodo-50	0.2570	70.32	42.42	3.20
Sc-45	nodo-52	0.2937	83.67	48.53	1.95

Nombre	Outlet	Área (ha)	%Imper	Ancho (m)	%Pendiente
Sc-46	nodo-53	0.3283	82.50	54.59	3.76
Sc-47	nodo-54	0.2921	78.09	48.88	2.44
Sc-48	nodo-55	0.1359	100.00	40.76	2.13
Sc-49	nodo-56	0.0777	100.00	25.00	2.50
Sc-50	nodo-56	0.1170	100.00	31.10	4.86
Sc-51	nodo-52	0.0496	91.61	15.42	4.00
Sc-52	nodo-57	0.0766	100.00	18.87	0.80
Sc-53	nodo-59	0.2167	96.70	20.71	3.33
Sc-54	nodo-58	0.0850	94.65	20.51	3.49
Sc-55	nodo-53	0.0662	100.00	16.51	2.85
Sc-56	nodo-59	0.1594	100.00	19.94	2.57
Sc-57	nodo-60	0.1871	93.48	23.43	2.44
Sc-58	nodo-54	0.0899	75.29	22.86	3.33
Sc-59	nodo-60	0.1024	98.06	18.46	1.26
Sc-60	nodo-61	0.1316	97.60	23.46	1.26
Sc-61	nodo-56	0.0950	68.99	30.07	4.09
Sc-62	nodo-58	0.1160	61.00	22.61	4.83
Sc-63	nodo-66	0.4480	84.81	47.80	3.46
Sc-64	nodo-62	0.2858	48.76	34.79	6.09
Sc-65	nodo-67	0.6944	78.81	124.45	5.23
Sc-66	nodo-62	0.0379	94.91	10.56	4.27
Sc-67	nodo-63	0.4001	100.00	91.18	2.41
Sc-68	nodo-64	0.0252	100.00	7.40	2.00
Sc-69	nodo-65	0.3353	97.65	79.26	2.12
Sc-70	nodo-68	0.0260	76.04	7.34	5.39
Sc-71	nodo-69	0.2701	94.95	63.02	4.36
Sc-72	nodo-81	0.0219	100.00	5.50	4.24
Sc-73	nodo-82	0.2614	97.77	59.15	3.24
Sc-74	nodo-54	0.1257	98.26	20.83	2.14
Sc-75	nodo-70	0.3120	239.11	27.98	4.33
Sc-76	nodo-61	0.1234	39.55	18.53	2.48
Sc-77	nodo-63	0.0934	97.07	21.87	5.14
Sc-78	nodo-72	0.1054	100.00	25.12	4.26
Sc-79	nodo-65	0.1242	90.93	21.07	6.35
Sc-80	nodo-72	0.1013	96.78	25.75	2.60
Sc-81	nodo-70	0.2399	94.08	21.36	2.82
Sc-82	nodo-71	0.2130	91.82	24.26	0.89
Sc-83	nodo-74	0.2025	44.24	43.68	0.33
Sc-84	nodo-72	0.0881	47.00	21.28	2.32
Sc-85	nodo-73	0.0902	43.54	21.78	2.86
Sc-86	nodo-69	0.1261	90.27	29.50	3.22
Sc-87	nodo-84	0.3022	99.24	69.45	3.02
Sc-88	nodo-82	0.1182	96.82	27.68	1.88
Sc-89	nodo-83	0.2934	91.77	70.19	6.09
Sc-90	nodo-71	0.1681	99.64	23.42	1.09
Sc-91	nodo-76	0.1526	97.67	21.84	2.31
Sc-92	nodo-74	0.1000	94.95	22.74	2.86

Nombre	Outlet	Área (ha)	%Imper	Ancho (m)	%Pendiente
Sc-93	nodo-75	0.1021	98.45	23.17	2.24
Sc-94	nodo-73	0.0928	100.00	22.67	2.86
Sc-95	nodo-89	0.1918	98.31	20.45	2.62
Sc-96	nodo-84	0.1188	100.00	23.25	3.68
Sc-97	nodo-83	0.0900	97.19	22.61	6.77
Sc-98	nodo-90	0.1710	89.70	22.70	4.80
Sc-99	nodo-85	0.0696	82.44	21.21	8.87
Sc-100	nodo-76	0.1458	98.32	20.85	2.87
Sc-101	nodo-107	0.3118	99.61	71.98	1.74
Sc-102	nodo-108	0.2808	100.00	76.17	4.11
Sc-103	nodo-75	0.1312	90.84	24.05	3.10
Sc-104	nodo-109	0.4155	100.00	79.40	3.67
Sc-105	nodo-89	0.2205	88.60	22.66	1.43
Sc-106	nodo-101	0.4136	96.79	63.48	2.88
Sc-107	nodo-103	0.1185	86.43	25.96	2.49
Sc-108	nodo-90	0.1613	100.00	18.01	7.81
Sc-109	nodo-92	0.0852	100.00	42.36	11.04
Sc-110	nodo-96	0.1459	57.81	31.19	2.92
Sc-111	nodo-105	0.0972	26.40	28.80	3.89
Sc-112	nodo-99	0.0963	74.55	36.91	4.49
Sc-113	nodo-92	0.0796	100.00	31.02	7.81
Sc-114	nodo-100	0.0552	100.00	35.74	8.37
Sc-115	nodo-95	0.0526	100.00	34.06	12.35
Sc-116	nodo-91	0.0641	100.00	33.32	15.27
Sc-117	nodo-97	0.0601	76.96	32.52	14.91
Sc-118	nodo-93	0.0441	85.91	29.81	9.11
Sc-119	nodo-107	0.0701	75.51	22.18	6.08
Sc-120	nodo-113	0.3214	96.20	88.14	7.63
Sc-121	nodo-116	0.1393	99.12	37.95	5.20
Sc-122	nodo-108	0.0368	83.62	13.57	8.94
Sc-123	nodo-113	0.1355	90.48	82.48	3.65
Sc-124	nodo-112	0.1255	88.32	84.03	3.65
Sc-125	nodo-109	0.0569	0.00	13.09	4.55
Sc-126	nodo-111	0.1358	0.00	72.07	5.90
Sc-127	nodo-110	0.1328	0.00	71.06	4.53
Sc-128	nodo-113	0.0514	91.43	34.93	5.73
Sc-129	nodo-115	0.1043	100.00	62.07	5.99
Sc-130	nodo-111	0.0503	67.90	34.34	4.59
Sc-131	nodo-110	0.1547	93.97	94.90	2.17
Sc-132	nodo-115	0.0776	96.64	42.24	1.52
Sc-133	nodo-114	0.1025	81.35	73.71	1.88
Sc-134	nodo-105	0.0697	84.00	22.39	3.25
Sc-135	nodo-118	0.1880	73.15	55.39	2.45
Sc-136	nodo-100	0.0675	100.00	18.91	1.60
Sc-137	nodo-122	0.2091	100.00	58.81	2.51
Sc-138	nodo-97	0.1047	79.68	32.04	13.55
Sc-139	nodo-127	0.1545	88.69	46.72	6.54

Nombre	Outlet	Área (ha)	%Imper	Ancho (m)	%Pendiente
Sc-140	nodo-125	0.1165	0.00	15.48	8.72
Sc-141	nodo-128	0.1427	0.00	18.60	7.54
Sc-142	nodo-127	0.0256	39.17	17.90	5.66
Sc-143	nodo-130	0.0582	100.00	31.40	7.91
Sc-144	nodo-128	0.1014	81.49	13.63	5.84
Sc-145	nodo-131	0.1665	83.59	20.16	7.16
Sc-146	nodo-116	0.0974	66.63	18.47	2.52
Sc-147	nodo-144	0.3305	97.94	63.77	3.70
Sc-148	nodo-115	0.1274	100.00	24.80	4.24
Sc-149	nodo-145	0.2649	92.65	61.29	4.06
Sc-150	nodo-115	0.0631	88.47	44.51	1.50
Sc-151	nodo-140	0.1222	100.00	23.46	3.14
Sc-152	nodo-141	0.3235	97.07	64.69	3.83
Sc-153	nodo-119	0.0950	45.81	18.18	3.77
Sc-154	nodo-121	0.1007	34.40	23.45	4.94
Sc-155	nodo-138	0.1828	65.64	37.67	4.14
Sc-156	nodo-139	0.1902	85.50	39.75	3.16
Sc-157	nodo-122	0.0669	39.01	20.25	4.16
Sc-158	nodo-130	0.1600	75.95	39.77	5.82
Sc-159	nodo-134	0.1405	93.37	33.63	3.33
Sc-160	nodo-134	0.0826	36.86	20.06	5.08
Sc-161	nodo-152	0.0868	40.66	21.27	3.16
Sc-162	nodo-131	0.1251	92.88	15.40	8.70
Sc-163	nodo-136	0.2090	86.67	37.64	4.36
Sc-164	nodo-132	0.0394	100.00	16.73	6.91
Sc-165	nodo-137	0.2063	97.91	40.52	7.16
Sc-166	nodo-135	0.0995	98.99	17.75	3.92
Sc-167	nodo-153	0.2578	91.38	21.53	3.69
Sc-168	nodo-137	0.1084	69.49	18.69	7.64
Sc-169	nodo-144	0.1218	100.00	23.16	1.13
Sc-170	nodo-148	0.2121	100.00	24.33	2.33
Sc-171	nodo-145	0.0956	100.00	23.47	2.49
Sc-172	nodo-141	0.1176	100.00	23.37	4.23
Sc-173	nodo-149	0.2352	98.80	23.20	2.78
Sc-174	nodo-139	0.1138	100.00	22.46	1.00
Sc-175	nodo-152	0.0987	100.00	22.20	0.98
Sc-176	nodo-155	0.4063	95.73	24.00	1.41
Sc-177	nodo-153	0.2747	98.99	23.63	2.19
Sc-178	nodo-148	0.1654	100.00	21.61	3.28
Sc-179	nodo-150	0.4421	95.66	24.59	1.93
Sc-180	nodo-149	0.2208	98.55	21.09	3.06
Sc-181	nodo-155	0.3804	68.33	23.50	1.96
Sc-182	nodo-156	0.5002	58.68	28.06	1.73
Sc-183	nodo-46	0.0110	97.00	110.60	2.50
Sc-184	nodo-48	0.0042	97.00	38.30	2.50
Sc-185	nodo-49	0.0007	97.00	7.00	2.50
Sc-186	nodo-77	0.0033	97.00	33.16	2.50

Nombre	Outlet	Área (ha)	%Imper	Ancho (m)	%Pendiente
Sc-187	nodo-78	0.0034	97.00	33.88	2.50
Sc-188	nodo-79	0.0017	97.00	17.41	2.50
Sc-189	nodo-123	0.0015	97.00	15.31	2.50
Sc-190	nodo-106	0.0039	97.00	39.58	2.50
Sc-191	nodo-142	0.0012	97.00	11.92	2.50
Sc-192	nodo-142	0.0017	97.00	17.00	2.50
Sc-193	nodo-142	0.0042	97.00	41.75	2.50
Sc-194	nodo-142	0.0029	97.00	30.15	2.50
Sc-195	nodo-143	0.0062	97.00	62.42	2.50
Sc-196	nodo-147	0.0035	97.00	35.61	2.50

PARÁMETROS DE LOS NODOS

Nombre	Elevación (m)	Nombre	Elevación (m)
Nodo-1	2716.72	Nodo-31	2708.48
Nodo-2	2714.72	Nodo-32	2707.80
Nodo-3	2715.00	Nodo-33	2708.89
Nodo-4	2716.52	Nodo-34	2711.00
Nodo-6	2717.50	Nodo-35	2714.00
Nodo-7	2714.99	Nodo-36	2708.22
Nodo-8	2714.34	Nodo-37	2707.55
Nodo-9	2713.01	Nodo-38	2707.21
Nodo-10	2712.50	Nodo-39	2707.02
Nodo-11	2712.30	Nodo-40	2707.56
Nodo-12	2710.87	Nodo-41	2706.82
Nodo-13	2709.65	Nodo-42	2708.86
Nodo-14	2712.80	Nodo-43	2706.85
Nodo-15	2712.25	Nodo-44	2706.15
Nodo-16	2712.00	Nodo-45	2716.42
Nodo-17	2712.35	Nodo-46	2714.40
Nodo-18	2713.52	Nodo-47	2714.60
Nodo-19	2713.00	Nodo-48	2714.15
Nodo-20	2715.00	Nodo-49	2714.04
Nodo-21	2712.50	Nodo-50	2716.22
Nodo-22	2712.02	Nodo-51	2715.88
Nodo-23	2711.82	Nodo-52	2715.55
Nodo-24	2711.62	Nodo-53	2715.31
Nodo-25	2714.00	Nodo-54	2713.84
Nodo-26	2709.15	Nodo-55	2176.11
Nodo-27	2709.35	Nodo-56	2175.72
Nodo-28	2715.60	Nodo-57	2715.08
Nodo-29	2709.15	Nodo-58	2714.81
Nodo-30	2708.78	Nodo-59	2714.72

Nombre	Elevación (m)
Nodo-60	2714.52
Nodo-61	2713.74
Nodo-62	2714.62
Nodo-63	2713.60
Nodo-64	2714.32
Nodo-65	2713.50
Nodo-66	2715.62
Nodo-67	2715.22
Nodo-68	2713.60
Nodo-69	2713.40
Nodo-70	2712.85
Nodo-71	2712.55
Nodo-72	2712.55
Nodo-73	2711.62
Nodo-74	2711.92
Nodo-75	2710.88
Nodo-76	2711.77
Nodo-77	2713.53
Nodo-78	2713.10
Nodo-79	2713.00
Nodo-80	2715.90
Nodo-81	2713.50
Nodo-82	2713.20
Nodo-83	2709.78
Nodo-84	2710.88
Nodo-85	2709.52
Nodo-86	2708.88
Nodo-87	2713.02
Nodo-88	2712.85
Nodo-89	2708.99
Nodo-90	2707.55
Nodo-91	2710.62
Nodo-92	2711.00
Nodo-93	2712.90
Nodo-94	2713.45
Nodo-95	2711.32
Nodo-96	2711.30
Nodo-97	2713.40
Nodo-98	2713.20
Nodo-99	2709.52
Nodo-100	2709.32
Nodo-101	2711.22
Nodo-102	2711.55

Nombre	Elevación (m)
Nodo-103	2711.85
Nodo-104	2710.98
Nodo-105	2709.82
Nodo-106	2712.45
Nodo-107	2712.25
Nodo-108	2712.15
Nodo-109	2711.95
Nodo-110	2709.88
Nodo-111	2708.48
Nodo-112	2707.88
Nodo-113	2708.98
Nodo-114	2709.66
Nodo-115	2707.70
Nodo-116	2708.68
Nodo-117	2707.99
Nodo-118	2708.85
Nodo-119	2708.58
Nodo-120	2708.89
Nodo-121	2706.99
Nodo-122	2708.33
Nodo-124	2711.85
Nodo-125	2709.85
Nodo-127	2710.65
Nodo-128	2709.15
Nodo-130	2707.88
Nodo-131	2706.58
Nodo-132	2706.28
Nodo-134	2705.42
Nodo-135	2704.82
Nodo-136	2705.98
Nodo-137	2704.21
Nodo-138	2706.32
Nodo-139	2705.77
Nodo-140	2707.84
Nodo-141	2705.89
Nodo-142	2711.12
Nodo-143	2706.82
Nodo-144	2706.35
Nodo-145	2706.05
Nodo-146	2706.00
Nodo-147	2706.62
Nodo-148	2705.88
Nodo-149	2705.31

Nombre	Elevación (m)
Nodo-150	2705.00
Nodo-151	2705.98
Nodo-152	2705.11
Nodo-153	2704.01
Nodo-154	2707.48
Nodo-155	2703.78
Nodo-156	2703.28
Nodo-157	2706.05
Nodo-158	2705.91
Nodo-159	2704.71
Nodo-161	2713.20
Nodo-162	2712.55
Nodo-163	2714.14
Nodo-164	2713.63
Nodo-165	2713.10
Nodo-166	2711.42
Nodo-167	2703.68
Nodo-5	2712.82
Nodo-123	2712.72

PARÁMETROS DE LOS CONDUCTOS

Nombre	Nodo de entrada	Nodo de salida	Longitud (m)	Rugosidad
calle-1	Nodo-1	Nodo-2	161.11	0.025
calle-10	Nodo-8	Nodo-48	1.00	0.016
calle-100	Nodo-81	Vert-2	52.52	0.016
calle-101	Nodo-58	Nodo-59	14.40	0.016
calle-102	Nodo-59	Nodo-60	48.08	0.016
calle-103	Nodo-60	Nodo-61	44.83	0.016
calle-104	Nodo-62	Nodo-63	92.26	0.016
calle-105	Nodo-66	Nodo-67	146.09	0.016
calle-106	Nodo-67	Nodo-64	49.61	0.016
calle-107	Nodo-64	Nodo-65	76.20	0.016
calle-108	Nodo-68	Nodo-69	66.09	0.016
calle-109	Nodo-81	Nodo-82	60.40	0.016
calle-11	Nodo-8	Nodo-163	20.00	0.016
calle-110	Nodo-61	Nodo-70	46.21	0.016
calle-111	Nodo-70	Nodo-71	46.68	0.016
calle-112	Nodo-71	Nodo-76	43.67	0.016
calle-113	Nodo-65	Nodo-72	47.06	0.016
calle-114	Nodo-72	Nodo-73	41.99	0.016
calle-115	Nodo-69	Nodo-84	98.01	0.016
calle-116	Nodo-82	Nodo-83	96.59	0.016
calle-117	Nodo-77	Nodo-87	62.46	0.016
calle-118	Nodo-87	Nodo-70	400.00	0.016

Nombre	Nodo de entrada	Nodo de salida	Longitud (m)	Rugosidad
calle-119	Nodo-70	Nodo-72	100.93	0.016
calle-12	Nodo-48	Nodo-49	20.00	0.016
calle-120	Nodo-78	Nodo-88	48.70	0.016
calle-121	Nodo-88	Nodo-71	44.67	0.016
calle-122	Nodo-71	Nodo-74	48.62	0.016
calle-123	Nodo-74	Nodo-73	46.73	0.016
calle-124	Nodo-73	Nodo-84	51.63	0.016
calle-125	Nodo-84	Nodo-83	47.33	0.016
calle-126	Nodo-83	Nodo-85	37.05	0.016
calle-127	Nodo-74	Nodo-75	43.92	0.016
calle-128	Nodo-79	Nodo-76	81.09	0.016
calle-129	Nodo-76	Nodo-75	44.02	0.016
calle-13	Nodo-163	Nodo-49	1.00	0.016
calle-130	Nodo-75	Nodo-89	99.80	0.016
calle-131	Nodo-89	Nodo-90	80.00	0.016
calle-132	Nodo-90	Vert-3	1.00	0.016
calle-133	Nodo-85	Nodo-86	21.88	0.016
calle-134	Nodo-86	Nodo-90	24.63	0.016
calle-135	Nodo-91	Nodo-90	41.71	0.016
calle-136	Nodo-106	Nodo-107	42.24	0.016
calle-137	Nodo-107	Nodo-108	39.76	0.016
calle-138	Nodo-108	Nodo-109	55.81	0.016
calle-139	Nodo-109	Nodo-103	32.69	0.016
calle-14	Nodo-163	Nodo-164	58.38	0.016
calle-140	Nodo-103	Nodo-104	9.66	0.016
calle-141	Nodo-104	Nodo-105	39.69	0.016
calle-142	Nodo-105	Nodo-99	23.95	0.016
calle-143	Nodo-99	Nodo-100	18.97	0.016
calle-144	Nodo-95	Nodo-100	15.77	0.016
calle-145	Nodo-97	Nodo-95	23.43	0.016
calle-146	Nodo-97	Nodo-98	12.87	0.016
calle-147	Nodo-103	Nodo-102	42.34	0.016
calle-148	Nodo-102	Nodo-101	35.84	0.016
calle-149	Nodo-101	Nodo-96	27.06	0.016
calle-15	Nodo-49	Nodo-77	58.38	0.016
calle-150	Nodo-96	Nodo-92	35.58	0.016
calle-151	Nodo-92	Nodo-91	15.53	0.016
calle-152	Nodo-93	Nodo-91	23.21	0.016
calle-153	Nodo-98	Nodo-93	49.98	0.016
calle-154	Nodo-94	Nodo-98	11.83	0.016
calle-155	Nodo-96	Nodo-99	65.92	0.016
calle-156	Nodo-95	Nodo-92	56.28	0.016

Nombre	Nodo de entrada	Nodo de salida	Longitud (m)	Rugosidad
calle-157	Nodo-107	Nodo-113	101.45	0.016
calle-158	Nodo-113	Nodo-116	36.76	0.016
calle-159	Nodo-113	Nodo-112	38.85	0.016
calle-16	Nodo-164	Nodo-77	1.00	0.016
calle-160	Nodo-111	Nodo-112	30.03	0.016
calle-161	Nodo-110	Nodo-111	10.23	0.016
calle-162	Nodo-109	Nodo-110	72.85	0.016
calle-163	Nodo-108	Nodo-112	90.44	0.016
calle-164	Nodo-142	Nodo-116	41.63	0.016
calle-165	Nodo-117	Nodo-115	56.64	0.016
calle-166	Nodo-114	Nodo-115	53.07	0.016
calle-167	Nodo-104	Nodo-114	77.10	0.016
calle-168	Nodo-105	Nodo-118	64.62	0.016
calle-169	Nodo-118	Nodo-119	14.31	0.016
calle-17	Nodo-164	Nodo-161	54.84	0.016
calle-170	Nodo-114	Nodo-120	33.43	0.016
calle-171	Nodo-120	Nodo-119	16.43	0.016
calle-172	Nodo-119	Nodo-122	33.45	0.016
calle-173	Nodo-100	Nodo-122	76.41	0.016
calle-174	Nodo-122	Nodo-130	53.11	0.016
calle-175	Nodo-130	Nodo-131	88.12	0.016
calle-176	Nodo-131	Nodo-132	26.04	0.025
calle-177	Nodo-97	Nodo-124	41.33	0.016
calle-178	Nodo-124	Nodo-127	39.01	0.016
calle-179	Nodo-127	Nodo-128	74.27	0.016
calle-18	Nodo-77	Nodo-78	54.84	0.016
calle-180	Nodo-124	Nodo-125	81.12	0.016
calle-181	Nodo-125	Nodo-128	35.09	0.016
calle-182	Nodo-128	Nodo-131	36.61	0.016
calle-183	Nodo-132	Nodo-137	64.43	0.016
calle-184	Nodo-137	Nodo-153	42.82	0.016
calle-185	Nodo-153	Nodo-155	46.73	0.016
calle-186	Nodo-155	Nodo-167	22.41	0.016
calle-187	Nodo-167	Nodo-156	59.48	0.016
calle-188	Nodo-117	Nodo-144	84.79	0.016
calle-189	Nodo-115	Nodo-154	11.42	0.016
calle-19	Nodo-161	Nodo-78	1.00	0.016
calle-190	Nodo-154	Nodo-145	76.04	0.016
calle-191	Nodo-140	Nodo-141	85.23	0.016
calle-192	Nodo-119	Nodo-121	44.03	0.025
calle-193	Nodo-121	Nodo-138	36.51	0.016
calle-194	Nodo-138	Nodo-139	42.33	0.016

Nombre	Nodo de entrada	Nodo de salida	Longitud (m)	Rugosidad
calle-195	Nodo-130	Nodo-151	18.79	0.016
calle-196	Nodo-151	Nodo-134	36.79	0.016
calle-197	Nodo-134	Nodo-152	42.33	0.016
calle-198	Nodo-136	Nodo-135	37.96	0.025
calle-199	Nodo-138	Nodo-134	40.73	0.016
calle-2	Nodo-3	Nodo-2	44.48	0.016
calle-20	Nodo-161	Nodo-165	34.07	0.016
calle-200	Nodo-134	Nodo-135	58.41	0.016
calle-201	Nodo-135	Nodo-137	61.56	0.016
calle-202	Nodo-143	Nodo-144	55.83	0.016
calle-203	Nodo-144	Nodo-145	400.00	0.016
calle-204	Nodo-145	Nodo-146	2.84	0.016
calle-205	Nodo-146	Nodo-141	53.24	0.016
calle-206	Nodo-141	Nodo-139	53.94	0.016
calle-207	Nodo-139	Nodo-152	48.05	0.016
calle-208	Nodo-152	Nodo-153	127.11	0.016
calle-209	Nodo-153	Vert-4	1.00	0.016
calle-21	Nodo-78	Nodo-79	34.07	0.016
calle-210	Nodo-146	Nodo-148	47.10	0.016
calle-211	Nodo-139	Nodo-149	45.60	0.016
calle-212	Nodo-147	Nodo-148	87.45	0.016
calle-213	Nodo-148	Nodo-149	107.04	0.016
calle-214	Nodo-149	Nodo-155	172.77	0.016
calle-215	Nodo-167	Vert-7	1.00	0.016
calle-216	Nodo-149	Nodo-150	43.70	0.016
calle-217	Nodo-157	Nodo-158	33.91	0.016
calle-218	Nodo-158	Nodo-150	157.42	0.016
calle-219	Nodo-150	Nodo-159	124.88	0.025
calle-22	Nodo-165	Nodo-79	1.00	0.016
calle-220	Nodo-159	Nodo-156	53.16	0.025
calle-221	Nodo-156	Vert-6	1.00	0.016
calle-222	Nodo-1	Nodo-4	115.90	0.016
calle-223	Nodo-45	Nodo-50	60.45	0.016
calle-224	Nodo-50	Nodo-55	29.32	0.016
calle-225	Nodo-55	Nodo-80	49.70	0.016
calle-226	Nodo-80	Nodo-66	96.27	0.016
calle-227	Nodo-84	Nodo-89	43.64	0.016
calle-228	Nodo-116	Nodo-117	12.87	0.016
calle-229	Nodo-45	Nodo-46	120.77	0.016
calle-23	Nodo-165	Nodo-5	33.98	0.016
calle-230	Nodo-4	Nodo-45	400.00	0.016
calle-24	Nodo-79	Nodo-123	33.98	0.016

Nombre	Nodo de entrada	Nodo de salida	Longitud (m)	Rugosidad
calle-25	Nodo-5	Nodo-123	1.00	0.016
calle-26	Nodo-5	Nodo-162	64.71	0.016
calle-27	Nodo-123	Nodo-106	64.71	0.016
calle-28	Nodo-162	Nodo-106	1.00	0.016
calle-29	Nodo-162	Nodo-24	116.51	0.016
calle-3	Nodo-6	Nodo-2	159.75	0.025
calle-30	Nodo-24	Nodo-166	43.89	0.016
calle-31	Nodo-106	Nodo-142	157.86	0.016
calle-32	Nodo-166	Nodo-142	1.00	0.016
calle-33	Nodo-166	Nodo-39	84.43	0.016
calle-34	Nodo-142	Nodo-143	84.43	0.016
calle-35	Nodo-39	Nodo-143	1.00	0.016
calle-36	Nodo-39	Nodo-41	47.06	0.016
calle-37	Nodo-143	Nodo-147	47.06	0.016
calle-38	Nodo-41	Nodo-147	1.00	0.016
calle-39	Nodo-41	Nodo-44	56.70	0.016
calle-4	Nodo-2	Nodo-8	146.25	0.025
calle-40	Nodo-147	Nodo-157	45.85	0.016
calle-41	Nodo-44	Nodo-157	1.00	0.016
calle-42	Nodo-157	Vert-1	2.00	0.016
calle-43	Nodo-20	Nodo-19	38.33	0.016
calle-44	Nodo-18	Nodo-19	400.00	0.025
calle-45	Nodo-19	Nodo-21	39.46	0.016
calle-46	Nodo-14	Nodo-21	52.77	0.025
calle-47	Nodo-14	Nodo-10	48.86	0.025
calle-48	Nodo-21	Nodo-11	60.60	0.016
calle-49	Nodo-9	Nodo-10	73.43	0.025
calle-5	Nodo-4	Nodo-7	89.46	0.016
calle-50	Nodo-10	Nodo-11	49.66	0.025
calle-51	Nodo-10	Nodo-15	88.61	0.025
calle-52	Nodo-11	Nodo-16	94.46	0.016
calle-53	Nodo-17	Nodo-15	26.05	0.025
calle-54	Nodo-15	Nodo-16	43.94	0.025
calle-55	Nodo-16	Nodo-23	50.61	0.016
calle-56	Nodo-22	Nodo-23	37.00	0.025
calle-57	Nodo-23	Nodo-24	65.83	0.016
calle-58	Nodo-11	Nodo-12	35.86	0.016
calle-59	Nodo-12	Nodo-13	18.20	0.016
calle-6	Nodo-7	Nodo-47	32.70	0.016
calle-60	Nodo-13	Nodo-27	12.54	0.016
calle-61	Nodo-27	Nodo-29	20.27	0.025
calle-62	Nodo-29	Nodo-33	64.36	0.025

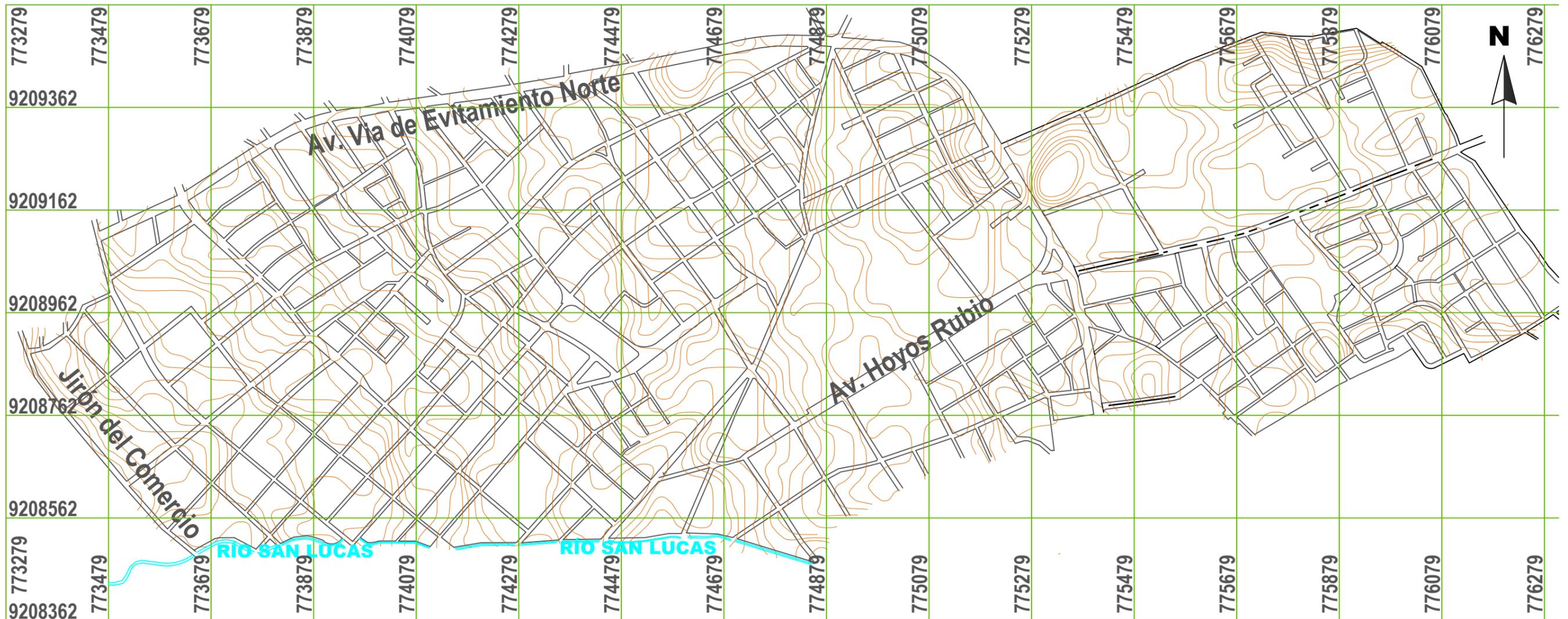
Nombre	Nodo de entrada	Nodo de salida	Longitud (m)	Rugosidad
calle-63	Nodo-25	Nodo-12	101.25	0.025
calle-64	Nodo-28	Nodo-27	82.58	0.025
calle-65	Nodo-35	Nodo-34	49.30	0.025
calle-66	Nodo-34	Nodo-33	21.43	0.025
calle-67	Nodo-13	Nodo-26	49.16	0.025
calle-68	Nodo-29	Nodo-30	21.92	0.025
calle-69	Nodo-30	Nodo-31	21.89	0.025
calle-7	Nodo-47	Nodo-8	43.01	0.016
calle-70	Nodo-30	Nodo-32	56.91	0.025
calle-71	Nodo-36	Nodo-37	52.76	0.025
calle-72	Nodo-33	Nodo-32	27.08	0.025
calle-73	Nodo-32	Nodo-37	30.24	0.025
calle-74	Nodo-37	Nodo-38	79.95	0.025
calle-75	Nodo-38	Nodo-39	79.95	0.025
calle-76	Nodo-40	Nodo-41	78.52	0.016
calle-77	Nodo-42	Nodo-43	10.33	0.025
calle-78	Nodo-43	Nodo-44	66.07	0.025
calle-79	Nodo-49	Nodo-54	61.88	0.016
calle-8	Nodo-46	Nodo-48	43.01	0.016
calle-80	Nodo-54	Nodo-61	72.23	0.016
calle-81	Nodo-61	Nodo-63	49.08	0.016
calle-82	Nodo-63	Nodo-65	48.26	0.016
calle-83	Nodo-65	Nodo-69	50.44	0.016
calle-84	Nodo-69	Nodo-82	48.54	0.016
calle-85	Nodo-50	Nodo-51	42.95	0.016
calle-86	Nodo-51	Nodo-52	49.34	0.016
calle-87	Nodo-52	Nodo-53	52.69	0.016
calle-88	Nodo-53	Nodo-54	53.45	0.016
calle-89	Nodo-51	Nodo-57	71.49	0.016
calle-9	Nodo-47	Nodo-46	1.00	0.016
calle-90	Nodo-52	Nodo-59	104.55	0.016
calle-91	Nodo-53	Nodo-60	85.35	0.016
calle-92	Nodo-55	Nodo-56	58.43	0.016
calle-93	Nodo-80	Nodo-56	55.50	0.025
calle-94	Nodo-56	Nodo-57	19.36	0.016
calle-95	Nodo-57	Nodo-58	60.35	0.016
calle-96	Nodo-58	Nodo-62	52.13	0.016
calle-97	Nodo-62	Nodo-64	53.22	0.016
calle-98	Nodo-64	Nodo-68	47.67	0.016
calle-99	Nodo-68	Nodo-81	50.00	0.016

APÉNDICE C

PLANOS

PLANO TOPOGRÁFICO

Escala: 1/8,000

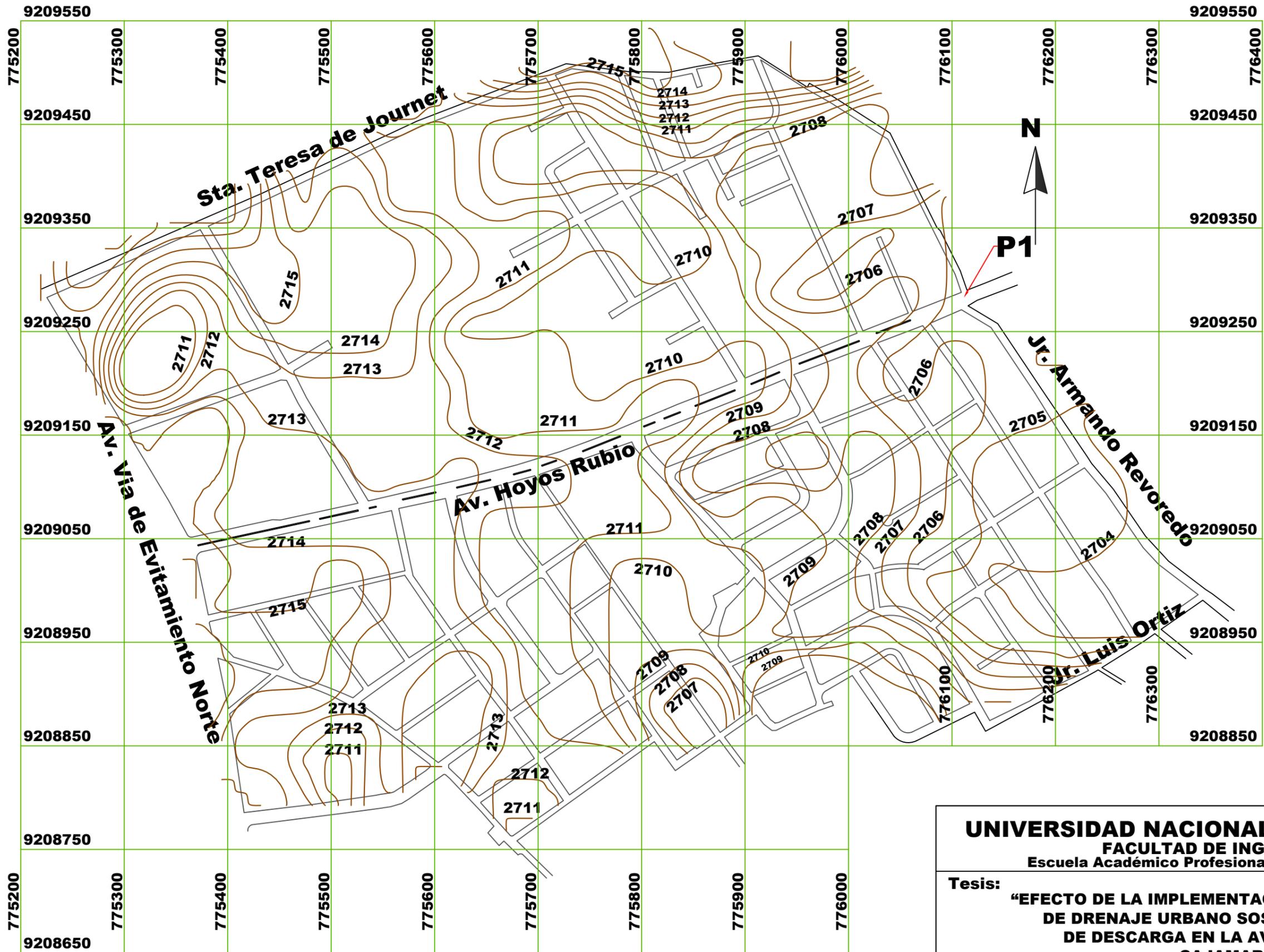


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis:
"EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS
DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL
DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO,
CAJAMARCA-2023"

Título:
**PLANO TOPOGRÁFICO
CUENCA URBANA**

Plano N°:
P-01



PLANO TOPOGRÁFICO

Escala: 1/3800



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis:

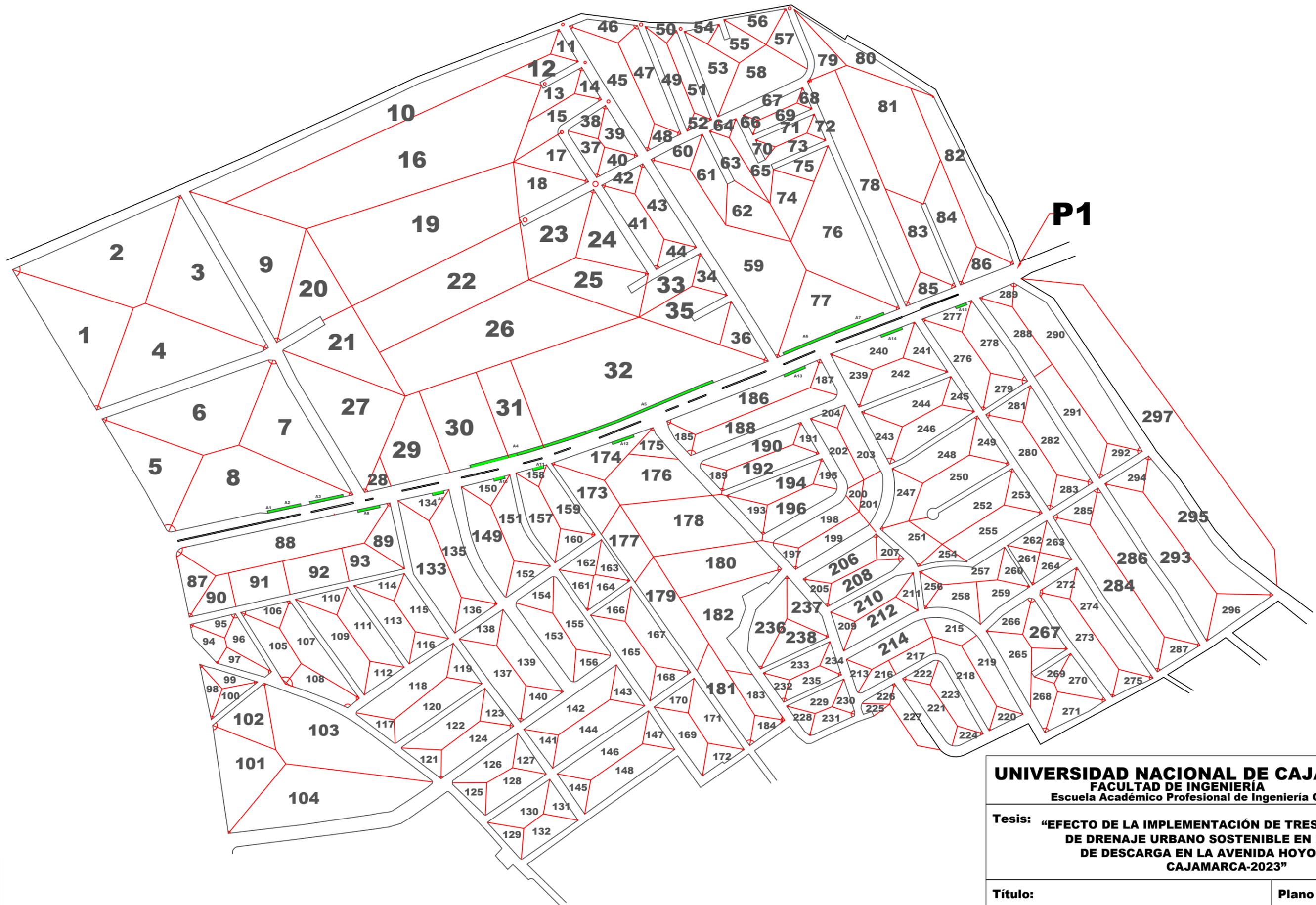
“EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023”

Título:

**PLANO TOPOGRÁFICO
ZONA DE ESTUDIO**

Plano N°:

P-02

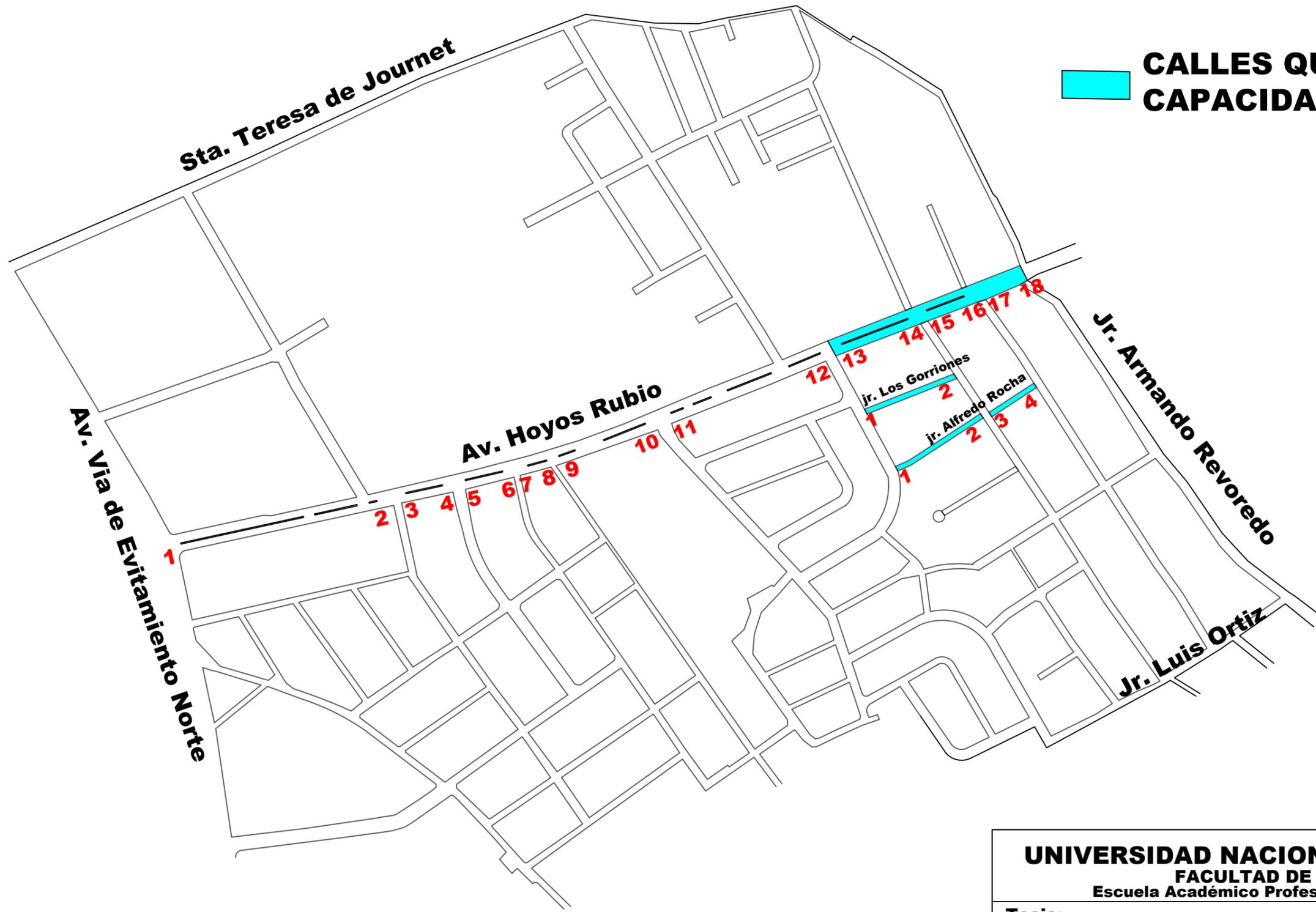


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis: “EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023”

Título:
PLANO DE SUBCUENCAS

Plano N°:
P-03

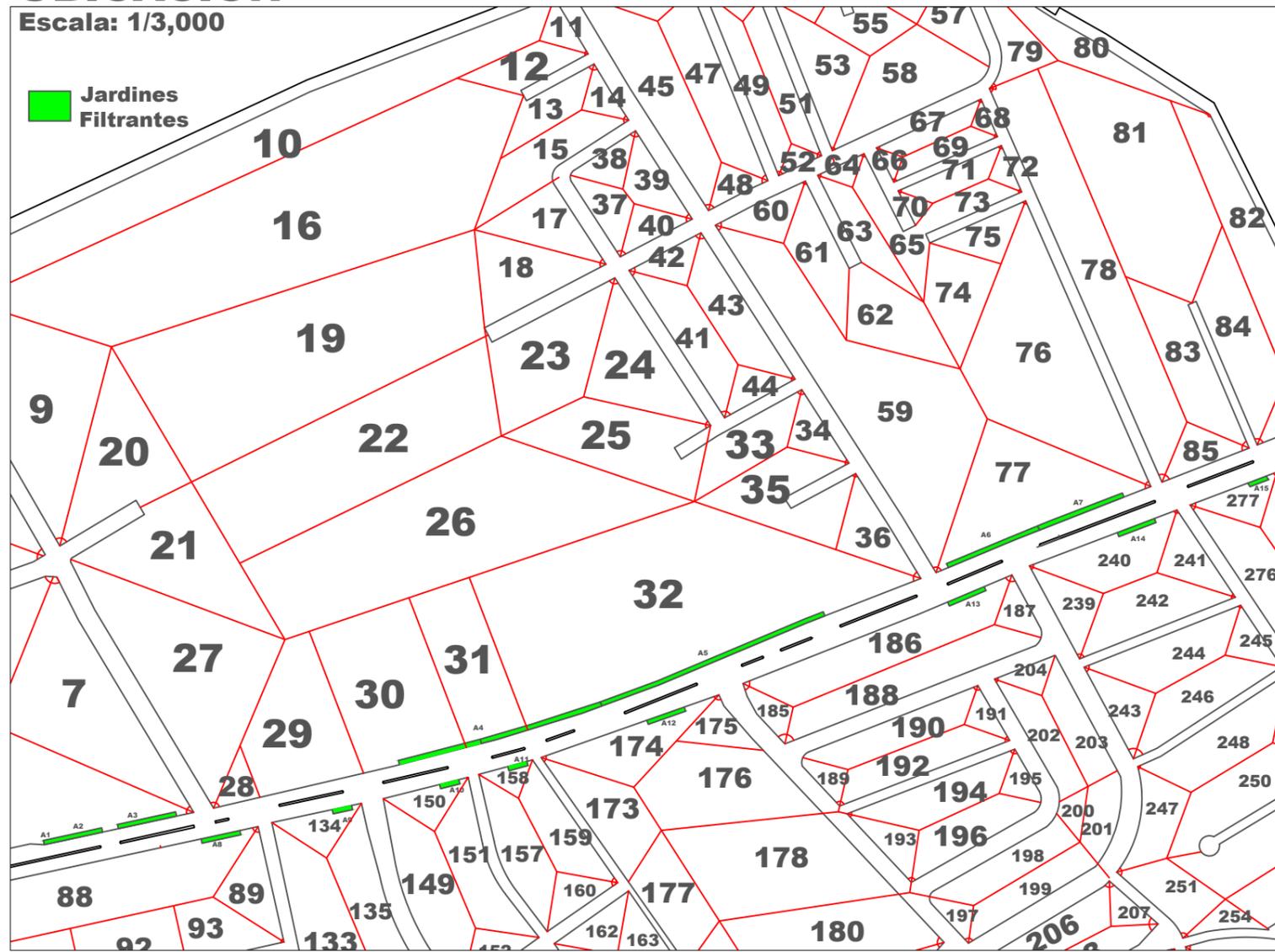


<p align="center">UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil</p>	
<p>Tesis: “EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023”</p>	
<p>Título:</p> <p align="center">PLANO DE CALLES QUE SUPERAN SU CAPACIDAD</p>	<p>Plano N°:</p> <p align="center">P-04</p>

UBICACIÓN

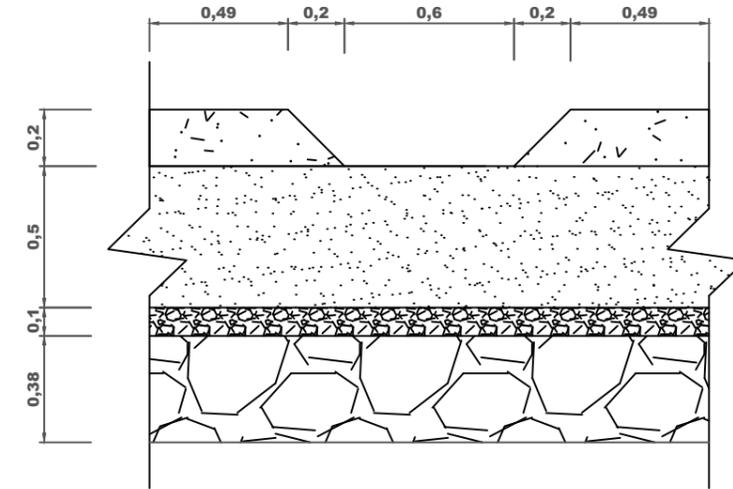
Escala: 1/3,000

 Jardines Filtrantes



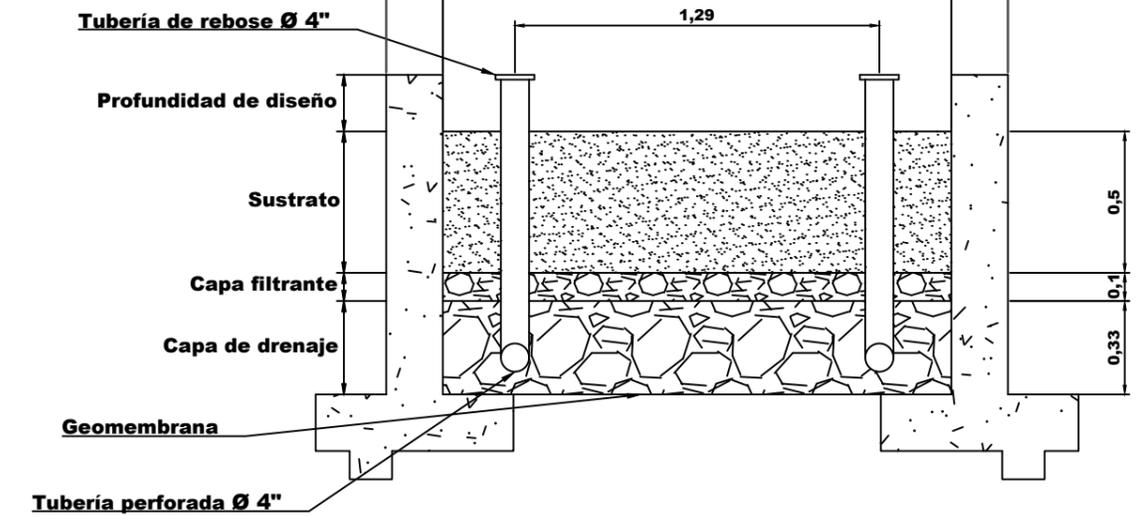
Detalle entrada

Escala: 1/25



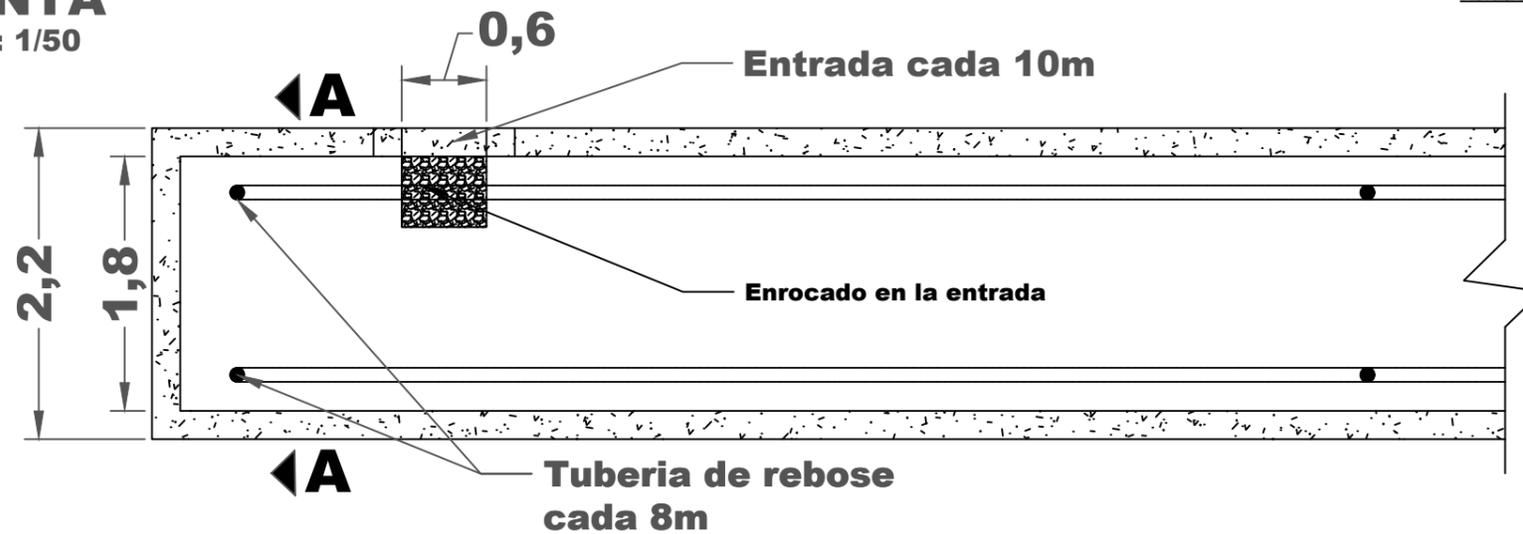
CORTE A-A

Escala: 1/25



PLANTA

Escala: 1/50



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

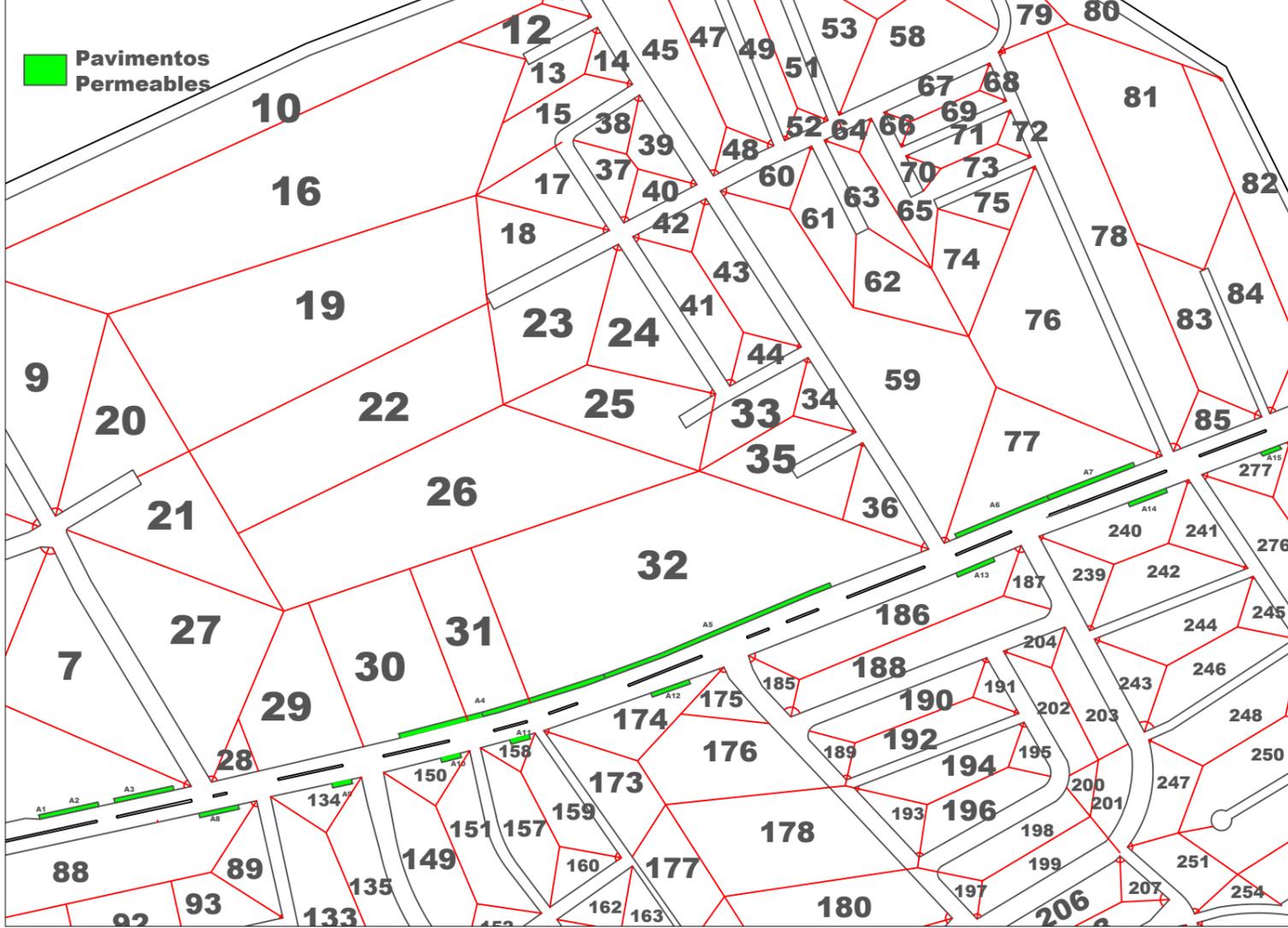
Tesis: "EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023"

Título:
JARDINES FILTRANTES -
DETALLES Y SECCIONES

Plano N°:
P-05

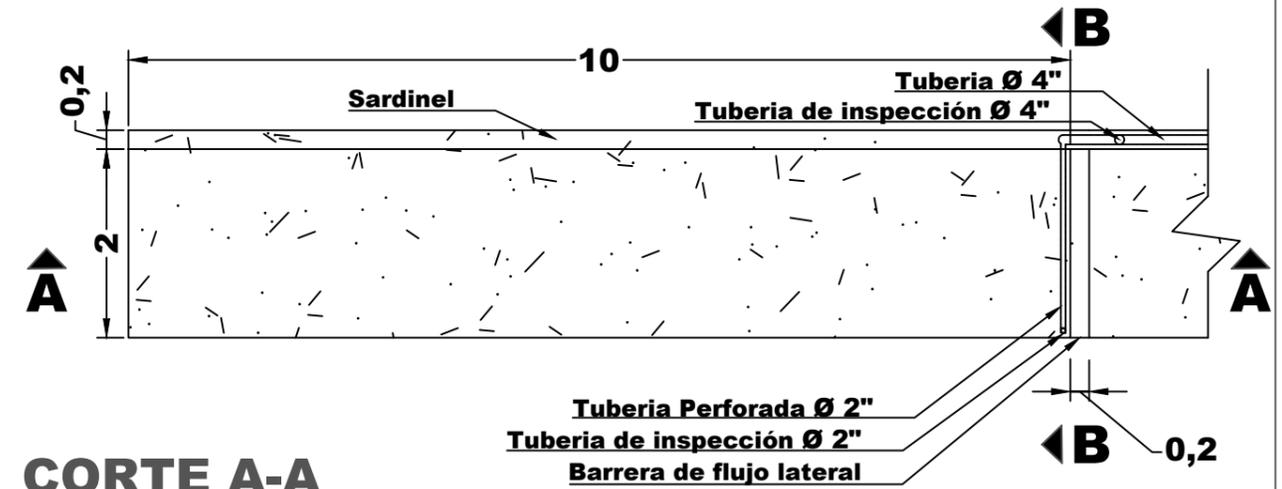
UBICACIÓN

Escala: 1/3000



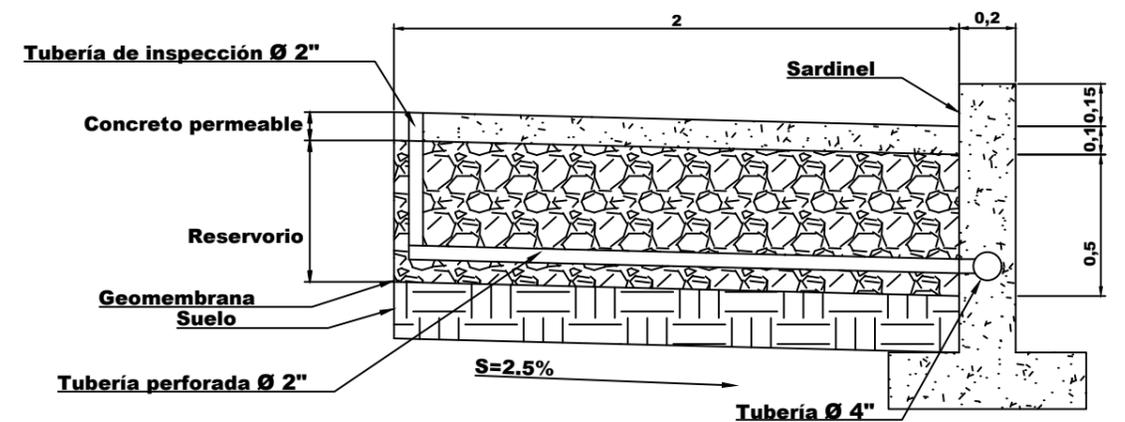
PLANTA

Escala: 1/75



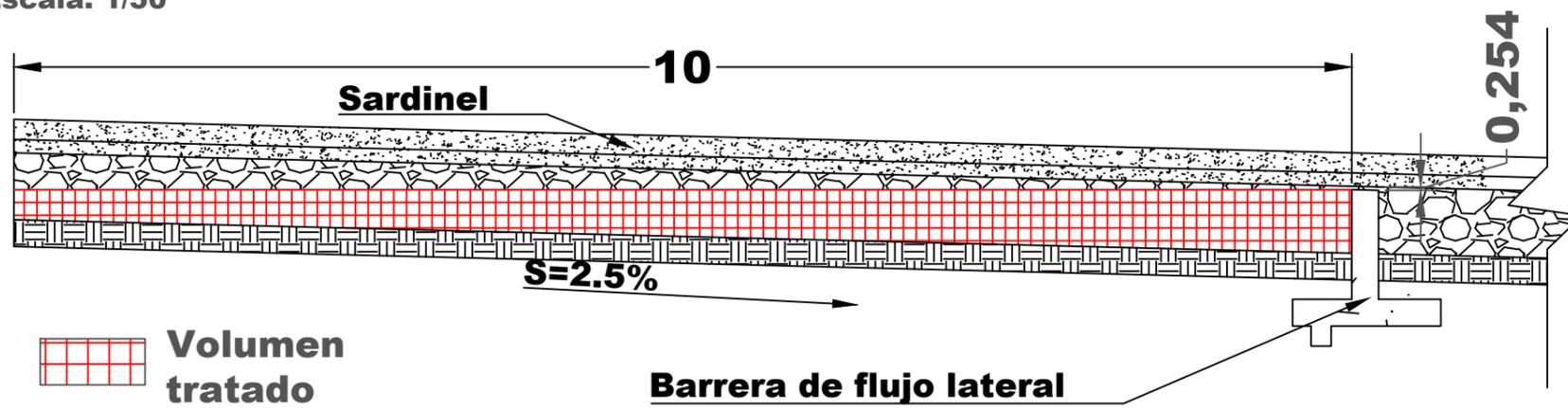
CORTE A-A

Escala: 1/25



CORTE A-A

Escala: 1/50



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis: "EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023"

Título:

**PAVIMENTOS PERMEABLES -
DETALLES Y SECCIONES**

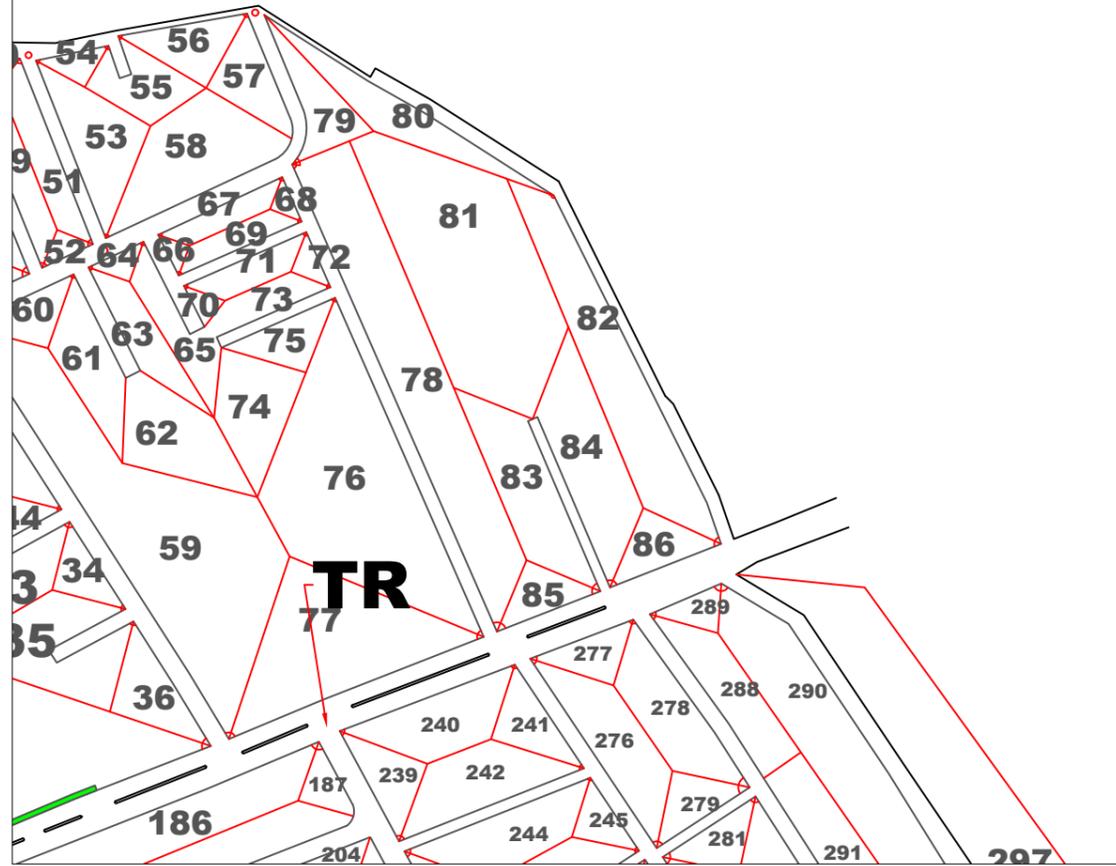
Plano N°:

P-06

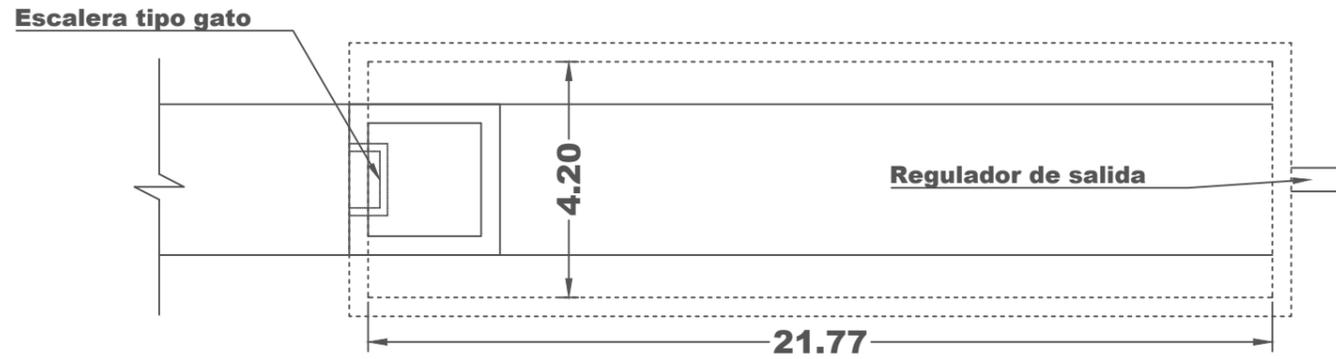
UBICACIÓN

Escala: 1/3000

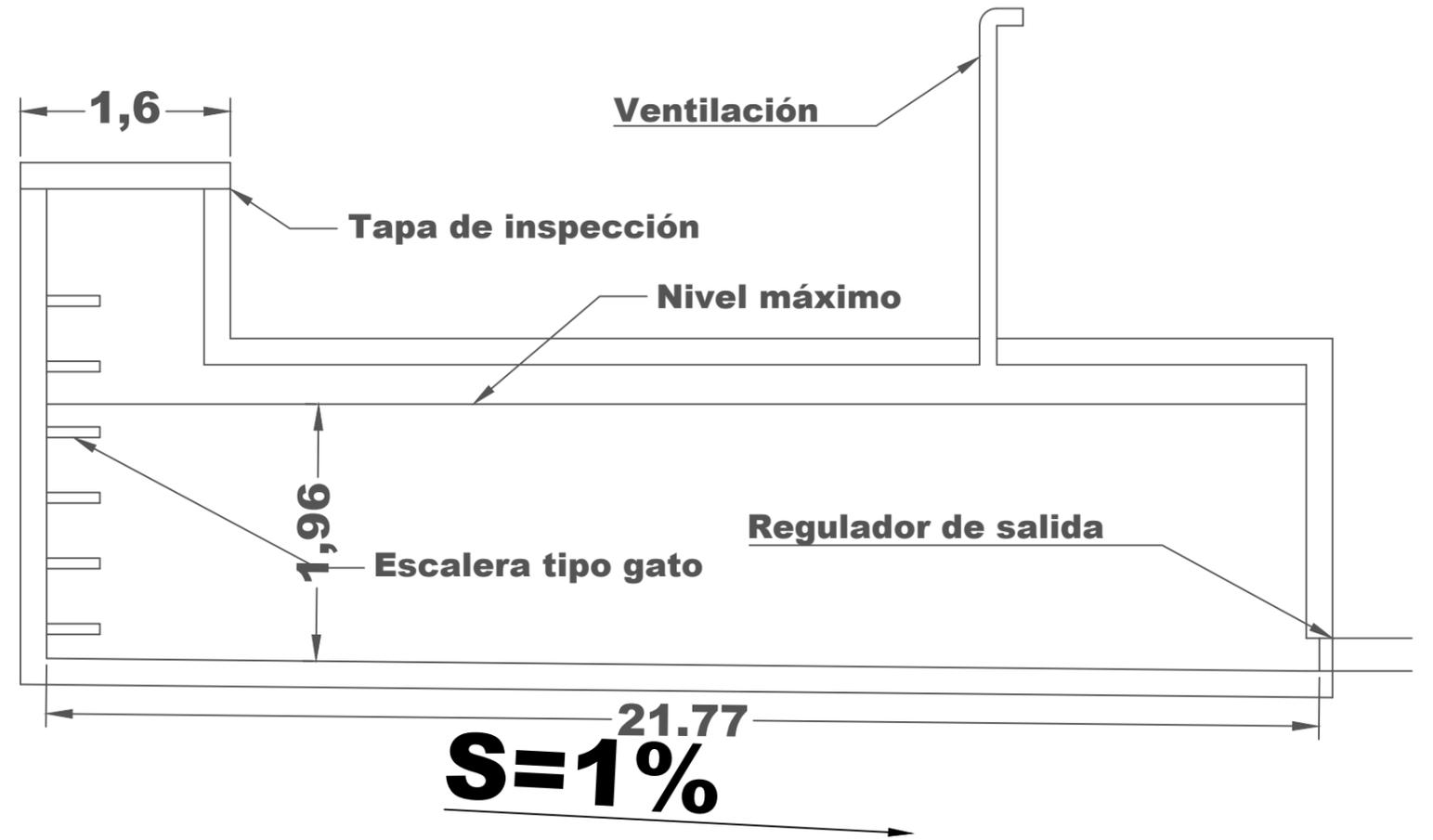
 Tanque de retención



Planta



Esquema tanque de retención



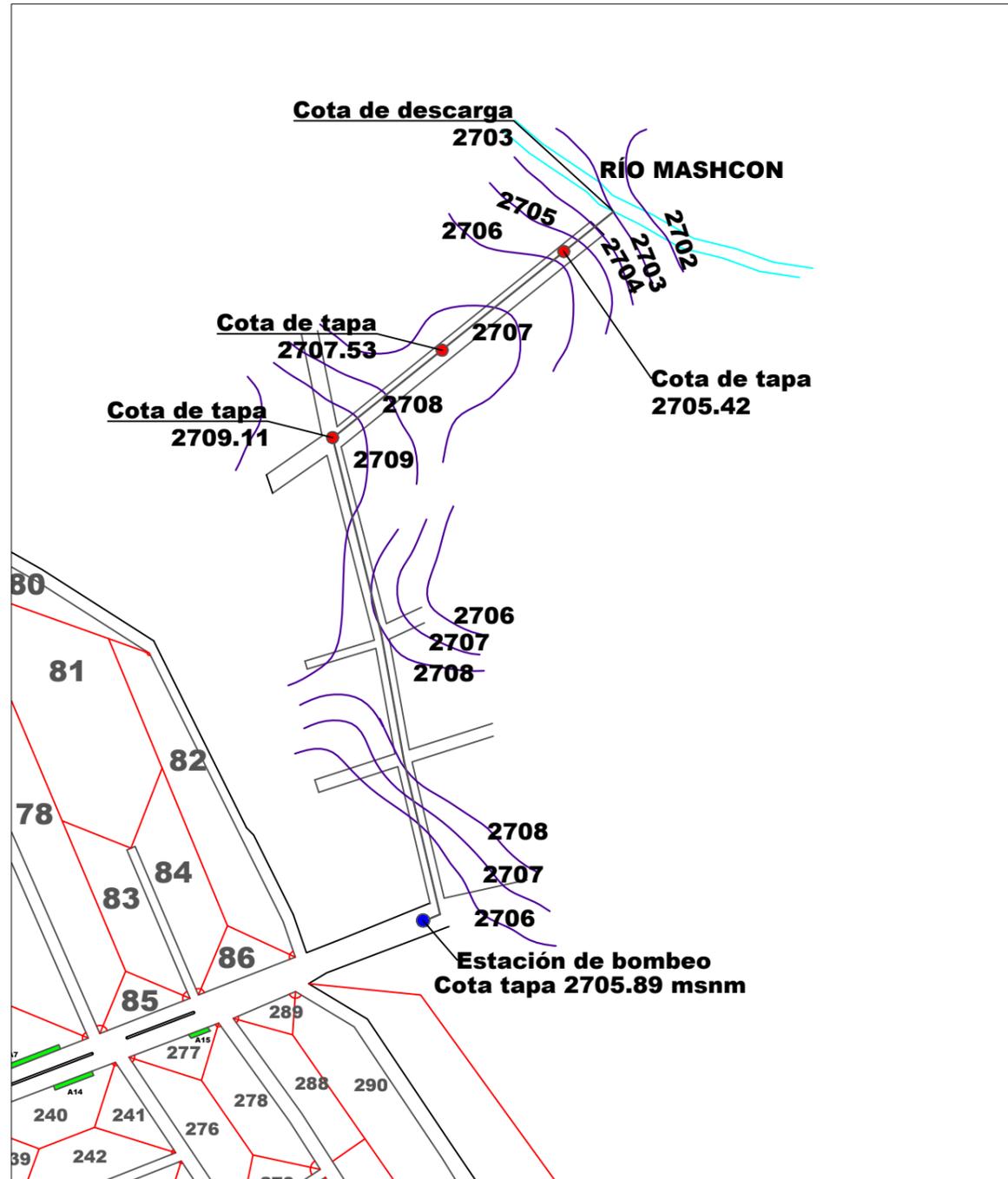
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis: "EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023"

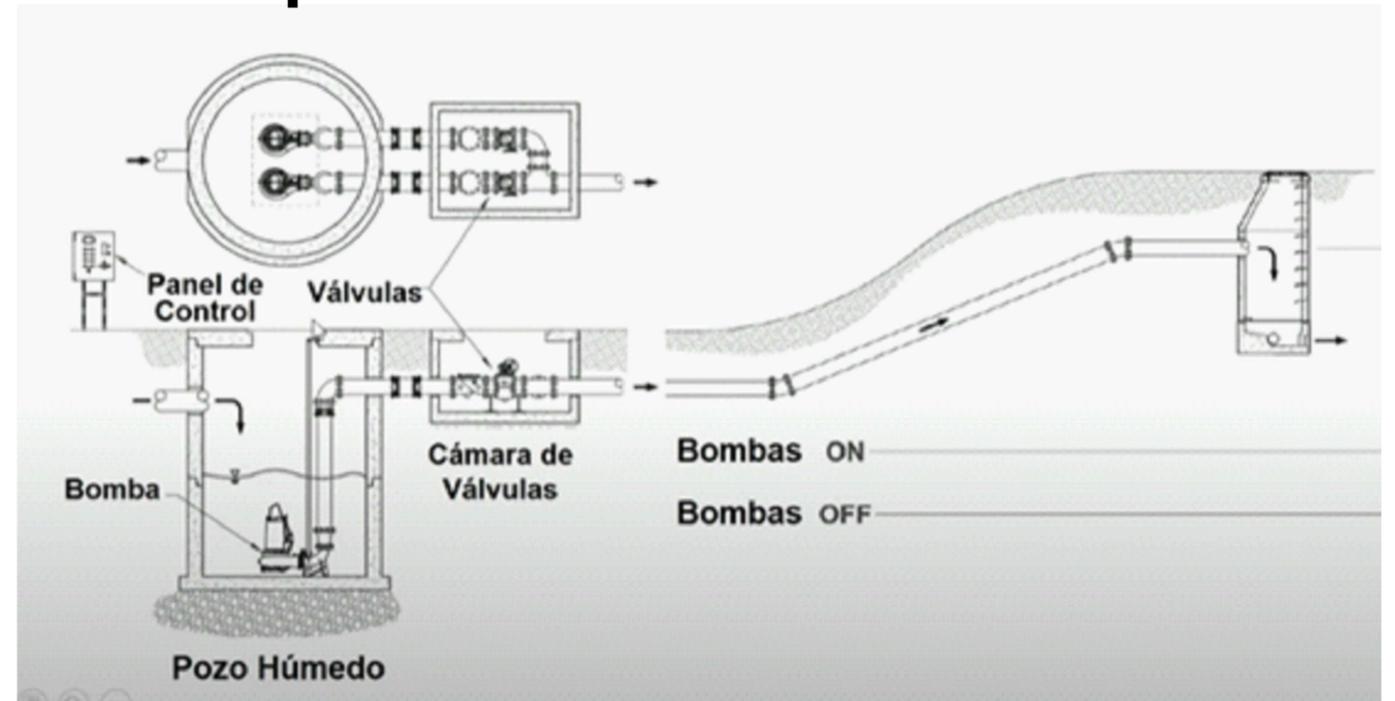
Título:
**Tanque de Retención -
DETALLES Y SECCIONES**

Plano N°:
P-07

UBICACIÓN



Esquema estación de bombeo solo con pozo húmedo



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis: “EFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TRES SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN EL CAUDAL DE DESCARGA EN LA AVENIDA HOYOS RUBIO, CAJAMARCA-2023”

Título:
UBICACIÓN DE LOS TANQUES DE RETENCIÓN

Plano N°:
P-08