



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL**

**MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO  
PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA EN SU  
TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA  
APLICANDO LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE  
PC-SWMM, AÑO 2022.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR: MARCOS JOEL NARANJO CHUQUISALA**

**DIRECTOR: Ing. JUAN CARLOS GONZÁLEZ GARCÍA Ph.D.**

Riobamba – Ecuador

2022

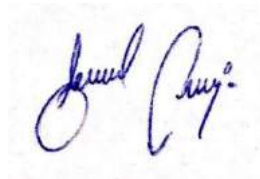
**©2022, Marcos Joel Naranjo Chuquisala**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, MARCOS JOEL NARANJO CHUQUISALA, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 30 de noviembre de 2022






**Marcos Joel Naranjo Chuquisala**

**C.I.: 060535178-2**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, “**MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022**”, realizado por el señor: **MARCOS JOEL NARANJO CHUQUISALA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Guillermo Eduardo Dávalos Merino, Mgs. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 _____	2022-11-30
Ing. Juan Carlos González García, Ph.D. <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	 _____	2022-11-30
Dra. Lourdes Cumandá Carrera Beltrán, Mgs. <b>ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	 _____	2022-11-30

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto de investigación se lo dedico principalmente a Dios, por brindarme la fortaleza y sabiduría necesaria para seguir adelante y por guiar mi vida con sus innumerables bendiciones y permitirme que siga cumpliendo cada una de mis metas y sueños. A mis amados padres que con su ejemplo me han enseñado el valor de la lucha y la perseverancia, quienes han caminado junto a mí en el transcurso de mi vida, celebrando conmigo mis logros alcanzados, apoyándome en cada obstáculo de mi vida, demostrándome que con amor y paciencia se puede alcanzar cosas maravillosas. Por todos ustedes se ha hecho posible este trabajo de integración curricular, todo este triunfo se los dedico a ustedes. Y finalmente a todas las personas tanto familiares, como amigos y docentes quienes han contribuido con su ayuda para lograr este gran objetivo.

Joel

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por guiar mi vida y darme la fortaleza para seguir mi trayecto de vida. A mi familia, especialmente a mis padres Inez, Napoleón y a mis hermanos Anabel, Marlon por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por haberme brindado los conocimientos y experiencias necesarias para forjarme exitosamente durante mi proceso académico. A mi director de trabajo de integración curricular Ing. Juan Carlos González García, a la Universidad de Lakehead en Canadá, al Dr. Stephen Hart docente de esta Universidad y a mi amigo Brian McLaren, por los conocimientos impartidos y el apoyo brindado durante mi estadía académica en Thunder Bay, Ontario. A la Dra. Magdy Milleni Echeverría Guadalupe y al Ing. Rafael Córdova, por haberme brindado la oportunidad de formar parte de un prestigioso grupo de investigación como lo es el GIDAC. Además, un profundo agradecimiento a mis docentes de la ESPOCH, por haberme brindado sus experiencias y conocimientos durante toda mi etapa de formación académica, en especial al Ing. Andrés Beltrán, Ing. Rafaela Viteri, Ing. Paulina Bolaños, Ing. Mayra Espinoza, Ing. Rafaela Pacurucu, Ing. Juan Carlos González e Ing. Sofía Godoy. Para finalizar a todos mis amigos en especial a: Arnold Diaz, Lisseth Montero, Joselin Parco, Santiago Salazar, Karla Fonseca, Ligia Simba, Vinicio, Verónica Sampedro, Carolina Velasteguí, Luisa López, Lady Paladines, Frank Hidalgo, Ian Vasco, Marisol Cadena, Erika Paredes, Lisbeth Inca y Nataly Villa.

Joel

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY / ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.1.	Planteamiento del Problema.....	2
1.2.	Limitaciones y delimitaciones.....	3
1.3.	Problema General de la Investigación.....	3
1.4.	Problemas específicos de investigación.....	3
1.5.	Objetivos.....	4
1.5.1.	<i>Objetivo General</i> .....	4
1.5.2.	<i>Objetivos Específicos</i> .....	4
1.6.	Justificación.....	5
1.6.1.	<i>Justificación Teórica</i> .....	6
1.6.2.	<i>Justificación Metodológica</i> .....	6
1.6.3.	<i>Justificación Práctica</i> .....	6
1.7.	Hipótesis.....	6

### CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.	Antecedentes de Investigación.....	7
2.2.4.	<i>Contaminación del agua</i> .....	11
2.2.4.1.	<i>Fuentes de contaminación</i> .....	11
2.2.5.	<i>Uso del Suelo</i> .....	11
2.2.6.	<i>Hidrología Urbana</i> .....	12
2.2.6.1.	<i>Características de una cuenca urbana</i> .....	13
2.2.6.2.	<i>Precipitación</i> .....	13

2.2.6.3.	<i>Infiltración</i> .....	14
2.2.7.	<i>Sistemas de drenaje urbano convencionales</i> .....	19
2.2.7.1.	<i>Componentes de un sistema de alcantarillado</i> .....	20
2.2.8.	<i>Sistemas sostenibles de drenaje Urbano o LIDs</i> .....	20
2.2.8.1.	<i>Clasificación y tipos de medidas</i> .....	22
2.2.8.2.	<i>Características de las Tecnologías LID</i> .....	33
2.2.8.3.	<i>Gestión jerarquizada</i> .....	34
2.2.8.4.	<i>Beneficios de las técnicas LID</i> .....	34
2.2.8.5.	<i>Inconvenientes de las técnicas LID</i> .....	39
2.2.9.	<i>Infraestructura verde</i> .....	40
2.2.9.1.	<i>Zonas verdes urbanas y servicios ecosistémicos</i> .....	41
2.2.10.	<i>Modelación hidrológica- hidráulica en EPA SWMM 5.2.1</i> .....	42
2.2.10.1.	<i>SWMM (Storm Water Management Model)</i> .....	42
2.2.10.2.	<i>Modelación hidrodinámica con SWMM</i> .....	47

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	48
3.1.	<b>Ubicación del área de estudio</b> .....	48
3.2.	<b>Esquema del marco metodológico</b> .....	49
3.3	<b>Características de la zona de estudio</b> .....	49
3.3.1.	<i>Determinación de parámetros geomorfológicos</i> .....	50
3.2.1.1.	<i>Geomorfología</i> .....	50
3.2.1.2.	<i>Geología</i> .....	51
3.2.1.3.	<i>Climatología</i> .....	52
3.2.1.4.	<i>Precipitaciones</i> .....	53
3.2.1.5.	<i>Uso del suelo</i> .....	54
3.2.1.6.	<i>Hidrología</i> .....	55
3.2.1.7.	<i>Hidrografía</i> .....	56
3.4.	<b>Modelación hidrológica de la Microcuenca del Río Chibunga</b> .....	56
3.4.1.	<i>Características hidrológicas del modelo</i> .....	56
3.4.1.3.	<i>Rugosidad superficial</i> .....	58
3.4.2.	<i>Creación del modelo en SWMM</i> .....	59



3.4.2.1.	<i>Diseño de técnicas LIDs</i> .....	61
3.4.2.2.	<i>Alternativas de Rehabilitación Sostenible</i> .....	64

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	78
4.1.	<b>Microcuenca del Río Chibunga</b> .....	78
4.2.	<b>Clasificación de uso del suelo del río Chibunga para los años 2001 y 2016</b> .....	78
4.3.	<b>Geomorfología de la microcuenca del río Chibunga.</b> .....	80
4.3.1.	<i>Resumen de características geomorfológicas de la microcuenca</i> .....	80
4.4.	<b>Análisis de la variabilidad de precipitación efectuada durante el primer semestre del año 2022.</b> .....	82
4.4.1.	<i>Resumen Semestral de la Precipitación efectuada durante el año 2022</i> .....	85
4.4.2.	<i>Resumen Semestral de la Precipitación media efectuada durante el año 2022</i> .....	86
4.5.	<b>Análisis de la variabilidad de evaporación efectuada durante el primer semestre del año 2022</b> .....	86
4.5.1.	<i>Resumen Semestral de la Evaporación efectuada durante el año 2022</i> .....	90
4.5.2.	<i>Resumen Semestral de la Evaporación media efectuada durante el año 2022</i> .....	91
4.6.	<b>Relación de la Precipitación y Evaporación media durante el primer semestre del año 2022</b> .....	92
4.7.	<b>Análisis de la variabilidad de temperatura mensual efectuada durante el primer semestre del año 2022.</b> .....	93
4.8.	<b>Modelación con PC-SWMM</b> .....	94
4.8.1.	<i>Resumen de los parámetros obtenidos para las Alternativas LID</i> .....	94
4.8.2.	<i>Escenarios LID mediante el uso de SWMM 5.2.1.</i> .....	96
4.8.2.1.	<i>Escenario de simulación Sin la Aplicación de Alternativas LID</i> .....	96
4.8.2.2.	<i>Escenario de simulación Aplicando la Alternativa Sostenible 1 (Techo Verde)</i> .....	99
4.8.2.3.	<i>Escenario de Simulación Aplicando la Alternativa Sostenible 2 (Cuenca de Bioretención)</i> .....	102
4.8.2.4.	<i>Escenario de Simulación Aplicando la Alternativa Sostenible 3 (Pavimento Permeable)</i> .....	104
4.9.	<b>Análisis Comparativo de los Escenarios de Simulación</b> .....	107

<b>CONCLUSIONES</b> .....	109
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	111
<b>GLOSARIO</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Efectos de la urbanización en el funcionamiento del ciclo hidrológico.....	17
<b>Tabla 2-2:</b>	Número de curva de escurrimiento empleadas para cubiertas permeables.....	19
<b>Tabla 3-2:</b>	Medidas estructurales LID.....	30
<b>Tabla 4-2:</b>	Cuadro comparativo entre los sistemas de drenaje convencional y sistemas alternativos LID. ....	41
<b>Tabla 5-2:</b>	Capas en base a los diferentes tipos de LID.....	46
<b>Tabla 6-3:</b>	Ubicación de la Estación Meteorológica.....	55
<b>Tabla 7-3:</b>	Aportes por infiltración .....	58
<b>Tabla 8-3:</b>	CN seleccionado en base al tipo de cubierta y grupo de suelo.....	58
<b>Tabla 9-3:</b>	Coeficientes de rugosidad de superficie. ....	59
<b>Tabla 10-3:</b>	Coeficiente n seleccionado en base a la cobertura de suelo.....	60
<b>Tabla 11-3:</b>	Combinaciones de capas para cada LID en SWMM 5.2.1. ....	64
<b>Tabla 12-3:</b>	Valores de medición de la rugosidad de la superficie.....	65
<b>Tabla 13-3:</b>	Parámetros definidos para las diferentes clases de suelo.....	66
<b>Tabla 14-4:</b>	Análisis multitemporal de la clasificación de uso del suelo en la microcuenca del río Chibunga para los años 2001 y 2016.....	79
<b>Tabla 15-4:</b>	Parámetros geomorfológicos de la microcuenca del río Chibunga. ....	81
<b>Tabla 16-4:</b>	Resumen de datos ingresados para LID Control (Cubierta verde). ....	94
<b>Tabla 17-4:</b>	Resumen de datos ingresados para LID Control (Cuenca de Biorretención).....	95
<b>Tabla 18-4:</b>	Resumen de datos ingresados para LID Control (Pavimento permeable).....	96

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-2:</b>	Proceso de escorrentía del agua.....	9
<b>Ilustración 2-2:</b>	Hidrología urbana.....	12
<b>Ilustración 3-2:</b>	Diagrama de los diferentes tipos e índices de humedad.....	15
<b>Ilustración 4-2:</b>	Pruebas de infiltración usando anillos concéntricos.....	16
<b>Ilustración 5-2:</b>	Curva de capacidad de Infiltración .....	16
<b>Ilustración 6-2:</b>	Sistema de alcantarillado .....	20
<b>Ilustración 7-2:</b>	Componentes de un sistema de alcantarillado.....	20
<b>Ilustración 8-2:</b>	Ejes principales del diseño de las tecnologías LID.....	21
<b>Ilustración 9-2:</b>	Impacto de la incorporación de LIDs en el hidrograma .....	22
<b>Ilustración 10-2:</b>	Terminología de las técnicas LID.....	22
<b>Ilustración 11-2:</b>	Elementos típicos de una cubierta vegetal.....	24
<b>Ilustración 12-2:</b>	Techo verde en la sede de la “British Horse Society”.....	25
<b>Ilustración 13-2:</b>	Construcción de una zanja de infiltración profunda. ....	26
<b>Ilustración 14-2:</b>	Parte de un sistema de biorretención.....	27
<b>Ilustración 15-2:</b>	Ejemplo de un sistema de bio-retención.....	28
<b>Ilustración 16-2:</b>	Esquema de diferentes tipos de pavimento permeable.....	29
<b>Ilustración 17-2:</b>	Superficie de césped reforzada en Passeig de Sant Joan en Barcelona.....	30
<b>Ilustración 26-2:</b>	Humedales.....	33
<b>Ilustración 27-2:</b>	Pilares fundamentales en el diseño de LIDs. ....	35
<b>Ilustración 28-2:</b>	Modelación hidrológica con PC-SWMM.....	43
<b>Ilustración 29-2:</b>	Componentes virtuales y físicos de SWMM 5.2.1.....	44
<b>Ilustración 30-2:</b>	Subáreas de una microcuenca en SWMM 5.2.1.....	45
<b>Ilustración 31-2:</b>	Esquemización del fenómeno de escorrentía .....	47
<b>Ilustración 32-3:</b>	Mapa Geográfico de la microcuenca del Río Chibunga.....	49
<b>Ilustración 33-3:</b>	Esquema del marco metodológico empleado en el proyecto de investigación	50
<b>Ilustración 34-3:</b>	Mapa Geomorfológico de la Microcuenca del río Chibunga. ....	52
<b>Ilustración 35-3:</b>	Mapa Geológico de la Microcuenca del río Chibunga.....	53
<b>Ilustración 36-3:</b>	Mapa del Modelo digital de terreno (MDT) del río Chibunga .....	54
<b>Ilustración 37-3:</b>	Mapa de Isoyetas de la Microcuenca del río Chibunga .....	54

<b>Ilustración 38-3:</b>	Ubicación de la Estación Meteorológica.....	55
<b>Ilustración 39-3:</b>	Mapa que representa las curvas de nivel de la Microcuenca del río Chibunga.....	57
<b>Ilustración 40-3:</b>	Mapa que representa la red hidrográfica de la Microcuenca del río Chibunga.....	57
<b>Ilustración 41-3:</b>	Ponderación de CN en zonas permeables .....	59
<b>Ilustración 42-3:</b>	Interfaz del Software SWMM. ....	61
<b>Ilustración 43-3:</b>	Software SWMM 5.2.1.....	61
<b>Ilustración 44-3:</b>	LID Controls.....	60
<b>Ilustración 45-3:</b>	Ventana para agregar el Tipo de alternativa LID.....	60
<b>Ilustración 46-3:</b>	Parámetros definidos en la capa superficial.....	66
<b>Ilustración 47-3:</b>	Valores proporcionados en función del tipo de suelo .....	67
<b>Ilustración 48-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Soil.....	68
<b>Ilustración 49-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Storage .....	69
<b>Ilustración 50-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Drain .....	70
<b>Ilustración 51-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Soil.....	71
<b>Ilustración 52-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Surface .....	72
<b>Ilustración 53-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Storage .....	73
<b>Ilustración 54-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Pavement.....	74
<b>Ilustración 55-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Surface .....	75
<b>Ilustración 56-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Soil.....	76
<b>Ilustración 57-3:</b>	Parámetros definidos en la capa Drainage mat.....	77
<b>Ilustración 58-4:</b>	Mapa de imagen satelital de la Microcuenca del río Chibunga.....	78
<b>Ilustración 59-4:</b>	Mapa de clasificación de uso de suelo de la microcuenca del Río Chibunga de los años 2001 vs 2016, Chimborazo, Ecuador.....	78
<b>Ilustración 60-4:</b>	Variación de la precipitación mensual del año 2022.....	82
<b>Ilustración 61-4:</b>	Variación de la precipitación mensual del año 2022.....	83
<b>Ilustración 62-4:</b>	Variación de la precipitación mensual del año 2022.....	83
<b>Ilustración 63-4:</b>	Variación de la precipitación mensual del año 2022.....	84
<b>Ilustración 64-4:</b>	Variación de la precipitación mensual del año 2022.....	84
<b>Ilustración 65-4:</b>	Variación de la precipitación mensual del año 2022.....	85

<b>Ilustración 66-4:</b>	Resumen Semestral de la Precipitación efectuada durante el año 2022 ....	85
<b>Ilustración 67-4:</b>	Resumen Semestral de la Precipitación media efectuada durante el año 2022.....	86
<b>Ilustración 68-4:</b>	Variación de la evaporación mensual del año 2022.....	87
<b>Ilustración 69-4:</b>	Variación de la evaporación mensual del año 2022.....	88
<b>Ilustración 70-4:</b>	Variación de la evaporación mensual del año 2022.....	88
<b>Ilustración 71-4:</b>	Variación de la evaporación mensual del año 2022.....	89
<b>Ilustración 72-4:</b>	Variación de la evaporación mensual del año 2022.....	89
<b>Ilustración 73-4:</b>	Variación de la evaporación mensual del año 2022.....	90
<b>Ilustración 74-4:</b>	Resumen Semestral de la Evaporación efectuada durante el año 2022.....	90
<b>Ilustración 75-4:</b>	Resumen Semestral de la Evaporación media efectuada durante el año 2022.....	91
<b>Ilustración 76-4:</b>	Relación de la Precipitación y la Evaporación media durante el primer semestre del año 2022 .....	92
<b>Ilustración 77-4:</b>	Variación de la temperatura mensual efectuada durante el primer semestre del año 2022.....	93
<b>Ilustración 78-4:</b>	Reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software sin la aplicación de alternativas LID.....	97
<b>Ilustración 79-4:</b>	Resumen del reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software sin la aplicación de LIDS.....	98
<b>Ilustración 80-4:</b>	Serie de Tiempo de la variable escorrentía en CMS (m <sup>3</sup> /s), sin alternativas LID.....	98
<b>Ilustración 81-4:</b>	Reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 1.....	99
<b>Ilustración 82-4:</b>	Resumen del reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 1. ....	100
<b>Ilustración 83-4:</b>	Serie de Tiempo de la variable escorrentía en CMS (m <sup>3</sup> /s), aplicando la alternativa sostenible 1.....	101
<b>Ilustración 84-4:</b>	Reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 2.....	102
<b>Ilustración 85-4:</b>	Resumen del reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 2. ....	103

<b>Ilustración 86-4:</b>	Serie de Tiempo de la variable escorrentía en CMS (m <sup>3</sup> /s), aplicando la alternativa sostenible 2.....	103
<b>Ilustración 87-4:</b>	Reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 3.....	103
<b>Ilustración 88-4:</b>	Resumen del reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 3. ....	105
<b>Ilustración 89-4:</b>	Serie de Tiempo de la variable escorrentía en CMS (m <sup>3</sup> /s), aplicando la alternativa sostenible 3.....	106
<b>Ilustración 90-4:</b>	Análisis comparativo de los escenarios de simulación mediante SWMM 5.2.1.....	107

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, ENERO (2022)
- ANEXO B:** MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, FEBRERO (2022)
- ANEXO C:** MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, MARZO (2022)
- ANEXO D:** MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, ABRIL (2022)
- ANEXO E:** MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, MAYO (2022)
- ANEXO F:** MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, JUNIO (2022)
- ANEXO G:** MATRIZ DE RESUMEN DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, PRIMER SEMESTRE AÑO 2022
- ANEXO H:** PROPUESTA INTEGRAL DE MEJORAMIENTO URBANO DEL RÍO CHIBUNGA MEDIANTE TÉCNICAS LID
- ANEXO I:** PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE
- ANEXO J:** PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE
- ANEXO K:** PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE
- ANEXO L:** PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE
- ANEXO M:** PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE
- ANEXO N:** PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE
- ANEXO O:** REPRESENTACIÓN DE LA SERIE TEMPORAL EN PC-SWMM



## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue modelar la microcuenca del río Chibunga basado en LID (*Low Impact Development*) en su trayecto por el área urbana del Cantón Riobamba, aplicando las herramientas del software SWMM versión 5.2.1. Esta investigación partió de la recopilación y análisis de fuentes de información primaria de las tecnologías LID que estuvieron clasificadas como medidas estructurales y no estructurales. Se definieron posteriormente los parámetros de entrada necesarios para el modelado de los diferentes escenarios, entre los cuales fueron: parámetros hidrológicos, hidrográficos, geológicos y geomorfológicos, en donde se emplearon herramientas geoespaciales, como el análisis espacial, análisis espacial en 3D, hidrología, pendientes y drenaje en una base de datos de información geográfica. Se analizaron además las variables hidrológicas correspondientes a: precipitación, evaporación y temperatura que fueron obtenidas de la estación meteorológica de la ESPOCH-INAMHI. Una vez definidos los parámetros hidrológicos y las características de la microcuenca, se emplearon las herramientas del Software SWMM 5.2.1, en donde se evaluó el comportamiento de la escorrentía superficial total (*Total Runoff*) expresada en mm, en relación a 4 escenarios de simulación que fueron: escenario sin la incorporación de alternativas sostenibles LID, alternativa sostenible 1 (techos verdes), alternativa sostenible 2 (cuencas de biorretención) y alternativa sostenible 3 (pavimentos permeables). La alternativa sostenible 3, registró el valor de escorrentía más bajo en relación a los demás escenarios con un total de 55.25 mm, el cual fue considerada como la mejor alternativa sostenible para reducir la escorrentía pluvial convirtiéndose así, como el mejor escenario de simulación en estudio. Se recomienda impulsar el desarrollo investigativo en esta área para la ejecución de proyectos urbanos sostenibles, puesto que existe limitada información en el manejo de estas tecnologías, lo que dificulta la toma de decisiones para investigaciones futuras.

**Palabras clave:** <MODELACIÓN HIDROLÓGICA>, <ESCORRENTÍA>, <STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM)>, <AGUAS PLUVIALES>, <INFILTRACIÓN>.



2487-DBRA-UTP-2022

## ABSTRACT

The aim of this research was to model the micro-watershed of the Chibunga river based on LID (Low Impact Development) while it flows through the urban area of Riobamba County, applying SWMM software version 5.2.1. tools. This research started with the collection and analysis of primary information sources of LID technologies which were classified as structural and non-structural measures. The necessary input parameters for the modeling of the different scenarios were subsequently defined. They were: hydrological, hydrographic, geological and geomorphological parameters, where geospatial tools such as spatial analysis, 3D spatial analysis, hydrology, slopes and drainage were used in a geographic information database. Hydrological variables such as: precipitation, evaporation and temperature were also analyzed, they were obtained from the ESPOCH-INAMHI meteorological station. Once the hydrological parameters and the characteristics of the micro-watershed were defined, the SWMM 5.2.1 software tools were used to evaluate the behavior of total surface runoff (Total Runoff) expressed in mm related to 4 simulation scenarios: scenario without the incorporation of sustainable LID alternatives, sustainable alternative 1 (green roofs), sustainable alternative 2 (bioretention basins) and sustainable alternative 3 (permeable pavements). Sustainable alternative 3 registered the lowest runoff value related to the other scenarios with a total of 55.25 mm, which was considered as the best sustainable alternative to reduce rainfall runoff, thus becoming the best simulation scenario under study. It is recommended to promote research development in this area to implement sustainable urban projects, since there is limited information on the management of these technologies, which hinders the decision making for future research.

**Keywords:** <HYDROLOGICAL MODELLING>, <RUNOFF>, <STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM)>, <RAINWATER>, <INFILTRATION>.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Javier', with a date '2015' written below it.

## INTRODUCCIÓN

Las fuertes lluvias en entornos densos edificados provocan altos niveles de escorrentía, sobrecargando los sistemas de drenaje, provocando inundaciones, afectando a la calidad del agua y dañando la infraestructura de los drenajes urbanos. Un factor que aumenta la cantidad de escorrentía urbana es la falta de espacios verdes, ya que estas áreas reducen el tiempo de respuesta a la formación de la escorrentía, y su ausencia no favorece la infiltración y almacenamiento de estas aguas (Ordoñez, 2011, p.11).

La microcuenca del Río Chibunga se encuentra ubicada en la Provincia de Chimborazo, forma parte de la Subcuenca del Chambo, y está formada por la unión de los ríos Chimborazo y Sicalpa. La microcuenca atraviesa la ciudad de Riobamba de noroeste a sureste, desembocando en el río Chambo (Bach et al., 2013, p.42). El río Chibunga representa un recurso hídrico que ha tenido un impacto significativo en el desarrollo del cantón Riobamba, la población que habita cerca de las riberas utiliza sus aguas para la agricultura y la ganadería. Los ecosistemas que rodean la microcuenca se ven alterados por las actividades humanas, reduciendo así la cantidad y calidad de este recurso, así como su capacidad de retención de agua (Carson et al., 2017, p.67). La falta de consideración de factores de sustentabilidad para el manejo de la escorrentía en la microcuenca es evidente en el desarrollo urbano y la impermeabilización en el área de estudio, lo cual ha generado problemas de inundaciones como consecuencia de la alta escorrentía durante las precipitaciones, provocando daños materiales y al medio ambiente (Ordoñez, 2011, p.11).

Ante este problema, es necesario plantear medidas que permitan generar soluciones a los problemas de inundaciones y elegir la alternativa más efectiva para reducir su volumen. A nivel mundial, las tecnologías de drenaje urbano sostenible se están integrando con los sistemas de drenaje convencionales con el objetivo de incorporar el manejo de la cantidad y calidad de agua y la gestión del entorno urbano. Los Estados Unidos y Canadá en particular, han introducido el concepto de desarrollo de bajo impacto que incluye un enfoque de diseño de ingeniería y planificación regional para el manejo de la escorrentía a través de prácticas destinadas a replicar el ciclo del agua antes del desarrollo de las cuencas hidrográficas (Bach et al., 2013, p.42).

En el presente proyecto de investigación, se pretende implementar tecnologías LID (*Low Impact Development*) que tienen un potencial importante para solucionar el problema de inundaciones, para lo cual se parte de la recopilación de información primaria del área de estudio para la posterior generación de un modelo del sistema actual de la microcuenca con alternativas sostenibles para la gestión de aguas pluviales mediante la aplicación del Software PC-SWMM.

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, la contaminación ambiental es un problema global creciente, que en los últimos años se ha potenciado debido al desarrollo industrial, tecnológico y el crecimiento poblacional, el cual ha provocado graves daños a los ambientes naturales y a los seres vivos del planeta. El crecimiento demográfico exponencial genera cambios en la superficie terrestre, lo que provoca un aumento de la urbanización del suelo, y por tanto de su impermeabilidad produciendo un mayor volumen de escorrentía y un aumento en la velocidad de los flujos naturales, reduciendo el tiempo de concentración, tiempo de infiltración y de respuesta, capacidad hidráulica y caudales en el sistema, lo cual produce temperaturas más elevadas y mayores niveles de contaminación, alterando consecuentemente el funcionamiento del ciclo hidrológico.

El río Chibunga atraviesa la ciudad de Riobamba y 25 comunidades cercanas en donde durante su recorrido se ve afectado debido a que, las zonas residenciales, industriales, agrícolas y ganaderas descargan sus residuales líquidos y otros desperdicios y aguas servidas sin ningún manejo adecuado, mismos que por acción del viento y escorrentía son arrastrados hacia los afluentes ocasionando daños a este recurso hídrico, así como diferentes complicaciones sociales económicas y ambientales derivadas. Los procesos hidrológicos pueden cambiar profundamente en entornos urbanos; la implementación de áreas impermeables reduce significativamente la capacidad de permeabilidad del suelo y por lo tanto, cambia la capacidad de infiltración superficial del agua, en donde durante los eventos de lluvia surge un aumento en la cantidad de escorrentía superficial conduciendo a una disminución de la evapotranspiración el cual genera el colapso de los sistemas de drenaje e inundaciones ocasionando impactos sociales, económicos y ambientales. Tanto el aumento de la escorrentía de agua de lluvia como el lavado de contaminantes de las superficies urbanas tienen efectos degradantes en los cuerpos de agua receptores, incluidos cambios en la diversidad eco-hidrológica.

Bibliográficamente no existen registros ni información del uso o aprovechamiento de las diferentes tecnologías computacionales tales como, el manejo de Software avanzados para la gestión, análisis de series temporales y modelados hidrológicos de la microcuenca del río Chibunga con el fin de establecer herramientas de apoyo para la toma de decisiones, lo cual limita de esta forma la generación de nueva información relevante, así como el avance de la investigación.

## **1.2. Limitaciones y delimitaciones**

El presente estudio corresponde al análisis de la microcuenca del río Chibunga en su trayecto por el área urbana del cantón Riobamba, el cual limita: al Norte: Comunidades del cantón Riobamba; al Sur con el Cantón Chambo; al Este: Cantón Riobamba; al Oeste: Cantón Colta, según Cartografía base IGM.

El río Chibunga forma parte de la subcuenca del río Chambo, la microcuenca hidrográfica abarca una superficie de 471,50 Km<sup>2</sup> y su longitud es de 68,9 Km, desde la cota 4.800 msnm hasta la cota 2.600 msnm, se encuentra formado por la unión de los ríos: Chimborazo y Cajabamba. Las limitaciones que existen en el presente trabajo de investigación se deben principalmente a los aplicativos del Software PC-SWMM para la realización de distintos escenarios de simulación, entre los cuales se pueden mencionar, las rutinas de modelación de transporte de sedimentos y erosión, la propagación de contaminantes en el medio receptor y en el flujo subsuperficial, y la conexión integrada con Sistemas de Información Geográfica.

## **1.3. Problema general de la investigación**

Tasa incrementada de contaminación de la microcuenca del río Chibunga en su trayecto por el área urbana del cantón Riobamba derivada de procesos de escorrentía del agua.

## **1.4. Problemas específicos de investigación**

Dentro de los problemas específicos del presente proyecto de investigación, se pueden citar los siguientes:

- Crecimiento demográfico
- Incremento del área urbana
- Impermeabilización del suelo
- Aumento del volumen de escorrentía superficial de los suelos
- Pendientes del terreno elevadas
- Insuficiente capacidad en el sistema de alcantarillado
- Impactos provocados por las inundaciones en la infraestructura.

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo general***

Modelar la microcuenca del río Chibunga basado en desarrollo de bajo impacto (LID) en su trayecto por el área urbana del Cantón Riobamba aplicando las herramientas del software PC-SWMM.

### ***1.5.2. Objetivos específicos:***

- Fundamentar teórica y conceptualmente las técnicas de desarrollo de bajo impacto (LID) mediante la recopilación y análisis de fuentes de información primaria.
- Recolectar los parámetros clave de entrada necesarios para el modelado mediante el Software PC-SWMM.
- Evaluar el comportamiento de la microcuenca del río Chibunga a través de la simulación de escenarios LID.

## 1.6. Justificación

En los últimos años, la microcuenca del río Chibunga, al igual que otras microcuencas de la provincia de Chimborazo ha venido perdiendo su calidad del agua alterando consecuentemente el funcionamiento del ciclo hidrológico debido a acciones humanas irresponsables, así como a grandes eventos de precipitaciones suscitadas en diferentes épocas del año, los cuales han causado numerosas inundaciones, afectando a los habitantes de la zona debido a la generación de daños al entorno urbano y al ambiente (Bach et al., 2013, p.42). El crecimiento poblacional, el cambio del uso del suelo y la falta de planificación al momento de construir con materiales poco permeables impidiendo la infiltración del agua y aumentando el volumen de escorrentía, ha alterado el comportamiento del agua, provocando alteraciones en el ciclo hidrológico, generando a su vez, variaciones en las entradas y salidas del balance hídrico en la zona (Barrezueta, 2019, p.62).

En respuesta a la problemática antes planteada, el presente estudio busca generar una alternativa y una base para el desarrollo sostenible dentro del área de estudio, estableciendo nuevas alternativas de diseño, mediante la aplicación de medidas sostenibles como las técnicas LID que permiten regenerar el ciclo hidrológico previo a la intervención humana; además de ser menos costosas que las medidas de rehabilitación tradicionales.

La implementación de las técnicas LID, es una importante alternativa para combatir el impacto del auge de la construcción de las grandes urbes con zonas permeables bajas, el cual se convierte en una alternativa que permite la conservación y optimización de los recursos naturales al restaurar en cierto porcentaje el ciclo hidrológico a través de la recuperación de áreas permeables, reduciendo los volúmenes de inundación y mejorando el entorno urbanístico del sector (Bergeson et al., 2022, p.81).

Estas tecnologías engloban soluciones novedosas, prácticas y amigables con el medio ambiente, que permiten el aumento de la sostenibilidad ambiental (*Green Infrastructure*), lo cual incluye la reducción de la escorrentía de lluvia, el aumento de la biodiversidad y el almacenamiento de agua para períodos de sequía, ofreciendo una proyección social de mejoramiento para la preservación del medio ambiente y que a futuro puede ser empleada en otras regiones del país.

### ***1.6.1. Justificación teórica***

El presente trabajo de investigación se justifica mediante la incorporación de tecnologías de desarrollo de bajo impacto (LID) para la gestión y control de la escorrentía del agua superficial en la microcuenca del Río Chibunga durante su trayecto por el área urbana del Cantón Riobamba. Estas técnicas de manejo sostenible tienen relevancia tanto práctica como ambiental porque representan una propuesta que permite a la sociedad encontrar soluciones a los problemas relacionados a los procesos de escorrentía superficial en la zona y estos a su vez contribuyan a la conservación y la optimización de los recursos naturales mediante la recuperación de zonas permeables (Carson et al., 2017, p.67).

### ***1.6.2. Justificación metodológica***

El presente proyecto de investigación busca modelar la microcuenca del Río Chibunga en su trayecto por el área urbana de la ciudad de Riobamba aplicando las herramientas del software PC-SWMM, que es una herramienta profesional que proporciona GIS, orientada a la gestión de series temporales para todos los aspectos de la gestión del agua. Los resultados de este modelo pueden ser empleados para la ejecución de programas de respuesta inmediata a emergencias, diseño de sistemas nuevos o complementarios a los sistemas existentes, para la toma de decisiones sobre necesidades actuales relacionadas a este recurso, para la ejecución de proyectos de investigación relacionados a la calidad del agua entre otros.

### ***1.6.3. Justificación práctica***

Gracias a la estancia académica e investigativa que realicé en la Universidad de Lakehead ubicada en la provincia de Ontario-Canadá, dispongo del acceso gratuito a la licencia del Software PC-SWMM Versión 5.1.015, lo cual me ha permitido desarrollar un proyecto de investigación relacionado con la Gestión de aguas pluviales urbanas del río McIntyre perteneciente al Campus de la Universidad de Lakehead en la ciudad de Thunder Bay aplicando las herramientas del Software de Modelado Avanzado PC-SWMM, y a través de esto me da la oportunidad de continuar utilizando la misma herramienta tecnológica para el desarrollo del presente proyecto de investigación.

## **1.7. Hipótesis**

La implementación de técnicas LID en la microcuenca del Río Chibunga mediante el empleo de las herramientas proporcionadas por el Software PC-SWMM será una estrategia potencialmente efectiva y sostenible.



## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

La gestión sostenible del agua superficial no es una innovación reciente, existen evidencias desde tiempos históricos de que su empleo estaba muy extendido. El conocimiento social y cultural estaba estrechamente relacionados con el diseño y la planificación de estos sistemas, proporcionando la base para las técnicas modernas de gestión del agua (Bergeson et al., 2022, p.81). La gestión y manejo del agua estaba fuertemente influenciada por las creencias religiosas, así como por los desafíos socioeconómicos, geopolíticos, y climáticos que enfrentaron las civilizaciones antiguas (Ordoñez, 2011, p.11).

En la antigüedad, se emplearon también los humedales construidos, sistemas de infiltración y los métodos no estructurales. De hecho, investigaciones previas han comparado las tecnologías de drenaje incaicas de Machu Picchu con las técnicas de Desarrollo de Bajo Impacto (LID), debido a que empleaban cunetas serpenteantes, pavimentos infiltrantes, y sistemas de recolección de agua. A lo largo del tiempo, el estudio de los ciclos hidrológicos y las inundaciones generadas en áreas urbanas, ha sido un importante tema de investigación puesto que, la disminución de estos eventos naturales en los sistemas de drenaje convencionales existentes es insuficiente (Barrezueta, 2019, p.62). Por lo tanto, se han implementado varias estrategias de gestión de aguas pluviales urbanas en las últimas décadas, especialmente aquellas que controlan el área total impermeable; ejemplos de tales medidas incluyen: los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en el Reino Unido, el Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD) en Australia, y las Mejores Prácticas de Gestión (BMP) y Desarrollo de Bajo Impacto (LID) en los EE. UU y Canadá.

Estados Unidos, ha sido el primer país en abrir el camino hacia el estudio para la investigación y el desarrollo de guías de diseño relacionados a superficies permeables y, desde la década de 1980, se ha abordado los aspectos de la calidad del agua de las aceras permeables. El uso de sistemas permeables, tenían como objetivo minimizar la contaminación por la descarga de sistemas sanitarios únicos en épocas de lluvia, reduciendo los estándares de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano (García et al., 2021, p.120). En Europa, el manejo y gestión de las escorrentías urbanas se ha enfocado en el control de inundaciones, en donde hace aproximadamente una década se comenzó a tomar conciencia del problema de la contaminación difusa y desde entonces, se ha empezado a adoptar criterios combinados de cantidad y calidad del agua, intentando potenciar el valor social y ambiental con la integración paisajística (Ariza et al., 2019, p.110).

## 2.2. Referencias teóricas

### 2.2.1. Ciclo hidrológico del agua

La entrada de agua líquida y sólida a través de las precipitaciones y la liberación de agua gaseosa a través de la transpiración y la evapotranspiración conforman el sistema cerrado conocido como ciclo hidrológico. Además de las actividades anteriores, en los suelos y en los acuíferos tienen lugar otros procesos que influyen en la retención y el almacenamiento del agua a lo largo del ciclo hidrológico (Bach et al., 2013, p.42).

La escorrentía y la infiltración son dos ejemplos de estos procesos. El volumen de agua que fluye por un río (su caudal) fluctúa a lo largo del tiempo y del lugar como parte del ciclo hidrológico. El régimen hidrológico de un río está determinado por estas fluctuaciones. Los cambios temporales se producen durante o después de las tormentas; el aumento del caudal se debe a la escorrentía creada por el flujo de la corriente. Las inundaciones pueden producirse en circunstancias graves cuando la entrada de agua supera la capacidad del río para eliminarla, derramándose y cubriendo las regiones planas próximas (llanura de inundación) (González y Ramírez, 2017, p.19).

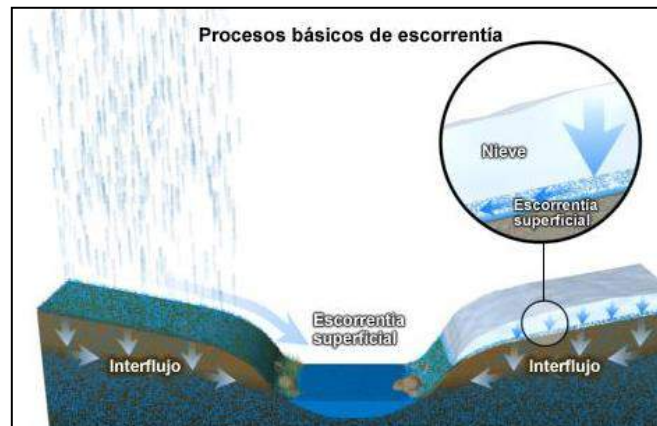
### 2.2.2. Escorrentía del agua

La parte de la precipitación conocida como escorrentía alimenta los arroyos superficiales continuos o intermitentes de una cuenca. Dependiendo de su procedencia, la escorrentía puede clasificarse como: escorrentía superficial o directa, hipodérmica o sub-superficial, y subterránea.

#### 2.2.2.1. Tipos de escorrentía

- **Escorrentía Superficial o Directa:** La precipitación que se desplaza sobre la superficie del suelo por la fuerza de la gravedad y no se infiltra en ningún momento se conoce como escorrentía superficial o escorrentía directa. Se trata de una precipitación que no se acumula en las depresiones del suelo ni se ve afectada por la evapotranspiración. La precipitación inicial se invierte en llenar la parte aérea de la capacidad de retención de las plantas y saturar el suelo. Este proceso está representado por el agua al principio de un aguacero y depende de las propiedades del suelo (Ariza et al., 2019, p.110).
- **Escorrentía Hipodérmica o Subsuperficial:** Es el agua de lluvia que, tras penetrar en el suelo, viaja sub-horizontalmente a través de las capas superiores antes de reaparecer al aire libre en forma de manantial y ser absorbida en micro-ranuras superficiales que la dirigirán a la red de drenaje (Burbano y Pasquel, 2015, p.145).

- **Escoorrentía Subterránea:** Es el agua de lluvia que se filtra en la capa freática, donde circula hasta llegar al sistema de drenaje. En orden de (m/h), la escoorrentía subterránea es la más lenta y la superficial la más rápida. Junto con estos otros tres tipos, la precipitación que llega directamente a la superficie de un curso de agua también contribuye a la escoorrentía, pero a menudo en cantidades mucho menores que las otras tres (García et al., 2021, p.120).



**Ilustración 1-2:** Proceso de escoorrentía del agua

Fuente: (Barrezueta, 2019, p.62).

### 2.2.3. Contaminantes

Los contaminantes son sustancias químicas que, a través de procesos químicos o físicos, pueden modificar negativamente la naturaleza o las circunstancias normales de una cosa o un medio (Yamane-Nolin y Larson, 2019, p.44). En los sistemas acuáticos, la contaminación se presenta de varias formas:

- **Química:** Productos químicos, artículos industriales, detergentes, aceites, combustibles, biocidas, herbicidas e insecticidas, etc.
- **Microbiológica:** Microorganismos patógenos (virus, bacterias entre otros).
- **Consumidores de Oxígeno:** Materiales biodegradables en abundancia
- **Materia en Suspensión:** Sustancias no solubles (Bach et al., 2014, p.18).

En donde algunas fuentes de contaminación están:

- **Aguas residuales municipales:** Vertidos de agua doméstica no tratada, compuestos orgánicos, residuos alimentarios, grasas, aceites, papel, etc., así como productos químicos (metales, detergentes, sales, etc.)
- **Lixiviados de los basureros:** Los líquidos que se crean cuando la basura se descompone y se filtran en el suelo (Bevilacqua y Arcuri, 2020, p.31).
- **Vertidos industriales, agricultura:** Los nitratos, los fosfatos, los metales pesados (arsénico, cadmio, mercurio, plomo, etc.), la contaminación térmica, agentes infecciosos y los materiales

radiactivos son ejemplos de este tipo.

- **Gases contaminantes:** Debido a una serie de gases producidos durante las operaciones industriales, como el óxido de azufre, el monóxido de nitrógeno y el dióxido de carbono (Burbano y Pasquel, 2015, p.145). Su procedencia está relacionada con actividades como:

- Transporte
- Agricultura y ganadería.
- Producción de energía eléctrica.
- Naturales
- Gestión de residuos
- Antropogénicas

Los medios receptores:

- Urbanos.
- Aire
- Agua
- Suelo.

#### *2.2.3.1. Contaminantes del agua*

La contaminación del agua provoca cambios en su sabor, densidad y pureza, entre otras cosas. La calidad del agua se ve afectada por los siguientes contaminantes y actividades:

- **Contaminantes orgánicos:** Proceden de fuentes industriales, residenciales y de asentamientos humanos y se degradan en el agua, reduciendo el oxígeno disuelto (Ariza et al., 2019, p.110).
- **Nutrientes:** Se componen principalmente de fosfatos y nitratos y se originan en las escorrentías, los residuos agrícolas y los desechos humanos y animales.
- **Materiales pesados:** Se desarrollan alrededor de centros mineros e industriales, operaciones militares o lixiviados.
- **Contaminación microbiológica:** Criaderos de animales y basura doméstica no tratada
- **Compuestos tóxicos orgánicos:** Dioxinas, hidrocarburos, plásticos, pesticidas, productos químicos industriales y contaminantes orgánicos persistentes (Cárdenas y Jaramillo, 2017, p.69).
- **Químicos traza y compuestos farmacéuticos:** Los residuos hospitalarios son materiales peligrosos que no siempre pueden eliminarse mediante procedimientos estándar.
- **Partículas suspendidas:** Pueden ser orgánicos o inorgánicos y están causados principalmente por los cambios en el uso del suelo y las actividades agrícolas.
- **Desechos nucleares:** Tiene una variedad de radio núcleos que se utilizan por razones pacíficas.

- **Salinización:** La presencia de sales en el suelo y el mal drenaje son sus causas. El afloramiento de agua de las regiones altas donde se practica el riego también contribuye a su aparición.
- **Acidificación:** Tiene que ver con el bajo pH del agua causado por el vertido de ácido sulfúrico de las actividades industriales y la contaminación urbana (Fan et al., 2019, p.211).

#### 2.2.4. Contaminación del agua

Cuando se modifican las características químicas, físicas o biológicas que la hacen inapropiada para el consumo diario o para su uso en operaciones domésticas, industriales o agrícolas, se dice que el agua está contaminada. Debido a la cantidad de residuos que se introducen en el agua, se pueden observar cambios en el color y la composición del agua (residuos domésticos, detergentes, petróleo, pesticidas y residuos nucleares). Estos residuos cambian el sabor, la densidad y la pureza de la sustancia. Hay varios tipos de contaminación del agua. Algunos de ellos son los residuos industriales y las aguas residuales (Yamane-Nolin y Larson, 2019, p.44).

##### 2.2.4.1. Fuentes de contaminación

Es todo aquello que produce la contaminación y podemos encontrar:

- **Fuentes puntuales:** Son aquellos que se reconocen fácilmente, es decir, que se pueden rastrear hasta su origen mediante una investigación si se conoce el contaminante descubierto en el medio ambiente y la acción que lo produjo (Carson et al., 2017, p.67).
- **Fuentes no puntuales:** Son los que suelen estar dispersos y son difíciles de encontrar.
- **Fuentes fijas:** Son aquellas, como las fábricas, que permanecen en el mismo espacio.
- **Fuentes móviles:** Se trata de fuentes que pueden moverse, como las fuentes móviles.

#### 2.2.5. Uso del suelo

Las características del suelo superficial o las categorías de actividad establecidas conocidas como usos del suelo se dan a las cuencas hidrográficas. Los siguientes son algunos ejemplos de usos potenciales del suelo: residencial, comercial, industrial y no urbanizado. Éstos sólo se tienen en cuenta para evaluar los fenómenos de acumulación y arrastre de contaminantes en la cuenca (Bergeson et al., 2022, p.81). Los siguientes procedimientos definen cada uno de los usos del suelo:

- **Acumulación del contaminante:** Se define como la masa de la cuenca en relación con su superficie. Se puede utilizar una función potencial para calcular la cantidad de contaminación acumulada, que depende de cuántos días de tiempo seco hubo antes de una tormenta. días de tiempo seco que preceden a la lluvia que puede calcularse utilizando una función de saturación, exponencial o una función potencial (Cárdenas y Jaramillo, 2017, p.69).

- **Arrastre del contaminante:** El arrastre exponencial, la curva de flujo de arrastre o la concentración media del episodio pueden utilizarse para describir este fenómeno, que se produce durante los periodos secos. En cada uno de estos escenarios, la acumulación de contaminantes se reduce a medida que se desarrolla el fenómeno de arrastre. Cuando ya no hay contaminantes acumulados, el fenómeno de arrastre termina de esta manera. Con sólo mencionar los mejores métodos de gestión utilizados a lo largo de la actuación de eliminación, las cargas de arrastre para un determinado contaminante y uso del suelo pueden disminuir en un porcentaje determinado (González y Ramírez, 2017, p.19).

### 2.2.6. *Hidrología urbana*

El estudio de la hidrología examina la aparición, circulación y distribución de las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, así como sus características biológicas, químicas y físicas y sus interacciones con el medio ambiente y con otros seres vivos. Dado que la urbanización provoca cambios significativos en el ciclo hidrológico natural debido al aumento de las superficies impermeables y a la construcción de sistemas de drenaje para la evacuación de las aguas pluviales, la hidrología urbana es el estudio del agua y sus relaciones con las diversas actividades antropogénicas en el ámbito urbano (Bevilacqua y Arcuri, 2020, p.31). Los sistemas de drenaje convencionales fueron creados con el objetivo de drenar rápida y eficientemente las áreas urbanas; como resultado, se ha descubierto que el coeficiente de escorrentía aumenta y el tiempo de concentración disminuye significativamente (Bach et al., 2014, p.18).



**Ilustración 2-2:** Hidrología urbana

Fuente: (Barrezueta, 2019, p.62).

El estudio de la hidrología incluye el ciclo hidrológico del agua, que es el flujo continuo de agua de la atmósfera a la tierra y luego de vuelta al mar. Cuando el agua llega al sistema de alcantarillado de una cuenca urbana, el proceso hidrológico se completa (Bevilacqua y Arcuri, 2020, p.31). Para poder modelizar este proceso, son necesarios los siguientes detalles:

### *2.2.6.1. Características de una cuenca urbana*

Las características físicas y morfológicas de una cuenca determinan su respuesta hidrológica. Estas características se obtienen a partir del terreno, la taxonomía, el uso y la cubierta del suelo, así como de los factores teóricos utilizados en el modelo del software SWMM para una cuenca urbana, entre ellos se tiene:

- Área de la subcuenca
- Pendiente media del terreno
- Amplitud de la subcuenca
- Porcentaje de impermeabilidad
- Porcentaje de regiones impermeables sin almacenamiento
- Rugosidad permeable e impermeable de la superficie
- Almacenamiento permeable e impermeable en superficies
- Parámetros de infiltración.

Las superficies de las cuencas urbanas se componen de varias formas de cobertura vegetal y artificial, cada una de las cuales tiene su propia rugosidad, capacidad de infiltración y permeabilidad. Por lo tanto, la infiltración que se produce en respuesta a las precipitaciones está directamente influenciada por la cubierta y el uso de cada zona. Los componentes de la superficie del suelo se utilizan para identificar las diversas formas de cobertura, como la cubierta vegetal y la cubierta construida, que se generan a partir de los datos recogidos por teledetección. Las zonas permeables, impermeables y mixtas son las diferentes categorías (Fan et al., 2019, p.211). A diferencia de la cubierta vegetal, el uso del suelo tiene en cuenta la actividad humana sobre el territorio; no tiene en cuenta criterios físicos sino factores socioeconómicos y humanos como puertos, zonas industriales y residenciales, procedentes del uso del suelo relacionado con diferentes asentamientos humanos (Houdeshel et al., 2015, p.49).

### *2.2.6.2 Precipitación*

Debido al calor en la superficie provocado por las variaciones de la radiación, las masas de aire ascienden a alturas de enfriamiento donde se produce la saturación, lo que da lugar a las precipitaciones. Los núcleos de condensación provocan la producción de gotas de lluvia, que se congregan y precipitan cuando hay movimiento vertical del aire. Las precipitaciones convectivas, orográficas y de convergencia son todos tipos de precipitación que se producen por las mismas circunstancias atmosféricas que provocan el movimiento vertical del aire (Ponnada et al., 2020, p.88). Las cuencas urbanas se diferencian de las rurales en que la precipitación está influenciada por una serie de factores únicos, entre los que se encuentran el tamaño de la cuenca, los tiempos de proceso

hidrológico acortados que hacen que la cuenca urbana sea sensible a los efectos de las precipitaciones muy intensas y de corta duración, y el tiempo de precipitación, que debe ser el más pequeño de los pasos de tiempo apropiados, entre 5 y 10 minutos, dependiendo del tamaño de la cuenca (Burbano y Pasquel, 2015, p.145).

El análisis de las precipitaciones aisladas es necesario para avanzar en la investigación de una cuenca hidrográfica. Para este tipo de análisis se pueden utilizar tres formas diferentes de información pluviométrica:

- Lluvias históricas que han sido registradas y que han provocado inundaciones importantes en la cuenca y la influencia histórica de la población. El diseño de proyectos en respuesta a este incidente tiene como objetivo evitar que las inundaciones vuelvan a producirse o reducirlas de manera que se evite que vuelvan a ocurrir y causen el mismo daño.
- Series temporales de precipitaciones recogidas en los observatorios de la región de investigación o series artificiales elaboradas mediante técnicas estadísticas. Es posible establecer el comportamiento de la cuenca y la frecuencia de las inundaciones, así como definir un hidrograma vinculado a un tiempo de retorno. Para proyectos con un tiempo de retorno de diseño corto, estas series son útiles (García et al., 2021, p.120).
- Lluvias de proyecto, que se representan mediante curvas de intensidad, adquiridas a partir de información globalizada.
- Duración y frecuencia relacionadas con el periodo de retorno que introducen el concepto de caudal de diseño y seguridad/riesgo. Utilizando un pluviómetro, se mide la cantidad de precipitación en milímetros, siendo las variables pertinentes la cantidad de precipitación en la subcuenca investigada y su intensidad, duración y variación geográfica (Ariza et al., 2019, p.110).

#### 2.2.6.2. *Infiltración*

La precipitación que cae en una cuenca urbana es completamente absorbida por la interceptación, la detención superficial o el almacenamiento en las distintas depresiones, escorrentía superficial y la humedad presente en el suelo. Estos elementos se explican a continuación:

- **Interceptación:** la cantidad de agua que cae sobre las plantas, los tejados o las cubiertas de los edificios pero que no llega al suelo y que posteriormente se evapora.
- **Detención superficial:** la cantidad de agua que se mantiene en charcos o depresiones antes de evaporarse.
- **Humedad del suelo:** es la cantidad de agua que se filtra en el suelo antes de ser absorbida por las raíces de las plantas o evaporada. antes de llegar a la capa freática. Se encuentran en las zonas saturadas y no saturadas del suelo.



- **Escorrentía superficial:** Es la parte de la precipitación que escurre por la superficie del terreno y llega a un curso de agua. La cantidad de precipitación que da lugar a la escorrentía superficial se denomina precipitación neta (Ponnada et al., 2020, p.88). Los siguientes tipos de humedad pueden encontrarse en la zona no saturada:
- **La humedad higroscópica:** forma una fina capa en la superficie de las partículas del suelo y se adhiere firmemente a ella; las plantas no pueden acceder a esta humedad. El suelo se mantiene húmedo gracias al vapor de agua atmosférico que absorben las partículas del suelo, lo que lo mantiene en la zona de aireación (Muthanna et al., 2018, p.77).
- **Humedad capilar:** pequeña cantidad de agua que asciende por los poros del suelo a través de la capilaridad desde la zona saturada. Suministro importante de agua para las plantas, a la que las raíces pueden acceder fácilmente.
- **Humedad gravitacional:** el agua se desplaza verticalmente desde la superficie del suelo hacia la zona saturada. Logra permanecer en el suelo durante poco tiempo.

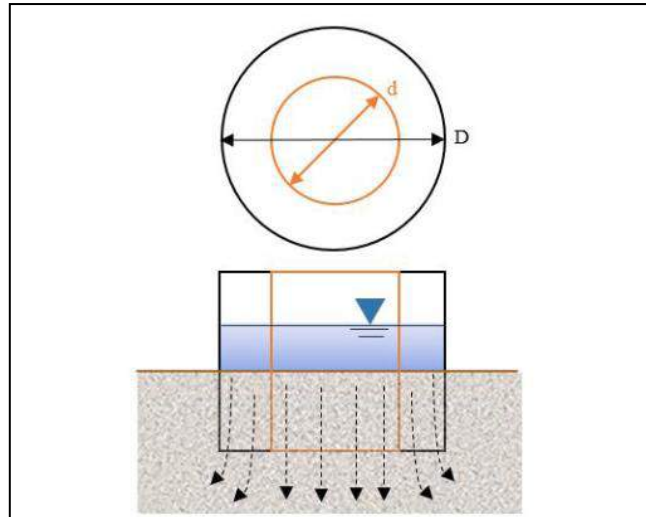


**Ilustración 3-2:** Diagrama de los diferentes tipos e índices de humedad.

Fuente: (Fan et al., 2019, p.211).

### Capacidad de infiltración

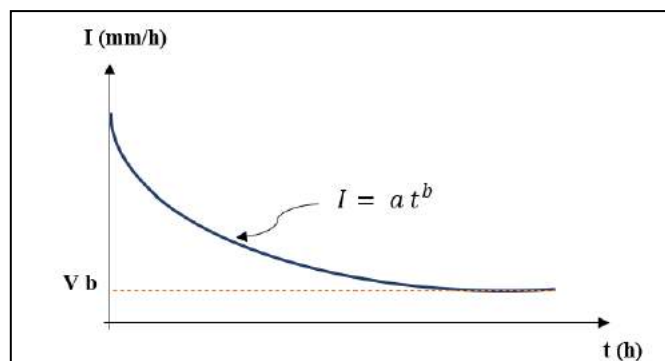
La mayor cantidad de agua que el suelo puede absorber en determinadas circunstancias se conoce como tasa de infiltración. Según la humedad del suelo, el nivel de compactación, el tipo de suelo, el uso del terreno, la pendiente, el contenido de humedad previo y el índice de porosidad, este valor cambia con el tiempo. Existen formas directas e indirectas de evaluar la capacidad de infiltración, como el uso de lisímetros, simuladores de precipitación, medidores de infiltración y mediciones directas del caudal y la precipitación. Es posible determinar cómo cambia la capacidad de infiltración a lo largo del tiempo realizando una prueba de infiltración con anillos concéntricos. La tasa de infiltración en mm/hr se mide utilizando un anillo exterior y un anillo interior que se introducen entre 6 y 10 cm en el suelo (Houdeshel et al., 2015, p.49).



**Ilustración 4-2:** Pruebas de infiltración.

Fuente: (Muthanna et al., 2018, p.77).

Los puntos de datos de la prueba se muestran en función del tiempo en la curva de capacidad de infiltración. La ecuación de esta curva tiene una apariencia de forma potencial.



**Ilustración 5-2:** Curva de capacidad de Infiltración

Fuente: (Fan et al., 2019, p.211).

Para la velocidad de infiltración, Kostiakov publicó la siguiente ecuación en el año de 1932:

$$I = a t^b \quad (\text{Ec.1-2})$$

**Dónde:**

**I** = Velocidad de infiltración (mm/h).

**t** = Tiempo de oportunidad. Período después del contacto con el agua y el suelo (h).

**a** = Coeficiente que describe la velocidad de infiltración del primer intervalo

**b** = Exponente adimensional que cambia en función de las propiedades del suelo (0 a -1).

Cuando la variación con respecto al tiempo es relativamente lenta o uniforme, se tiene en cuenta

la velocidad de infiltración básica (Ponnada et al., 2020, p.88). Cuando se mide en términos de tiempo, sucede numéricamente para un período de tiempo igual a:

$$t_b = -10b \quad (\text{Ec.2-2})$$

La conductividad hidráulica saturada del perfil del suelo y la tasa de infiltración básica son similares. Para cada sitio de prueba, la conductividad hidráulica saturada se utiliza para obtener la tasa de infiltración básica (Houdeshel et al., 2015, p.49). Las siguientes variables afectan directamente a la capacidad de infiltración medida por la prueba del anillo concéntrico:

- La temperatura del agua y del suelo, así como cualquier cambio en el entorno provocado por la actividad humana o la aparición de fisuras en las raíces de las plantas.

### Modelos de infiltración

Debido a la ausencia de cobertura vegetal, las pérdidas de precipitación en las cuencas urbanas tienen menos peso en el análisis que en las cuencas con topografía natural. Las pérdidas resultantes de la interceptación de la vegetación son mínimas. Dependiendo de la cantidad de suelo permeable y del almacenamiento en depresiones en regiones permeables e impermeables, esto tiene un mayor impacto en la infiltración (Muthanna et al., 2018, p.77).

**Tabla 1-2:** Efectos de la urbanización en el ciclo hidrológico.

Superficie	Infiltración superficial	Infiltración profunda	Evapotranspiración	Escurrentía
Natural	25%	25%	40%	10%
Impermeable (10-20%)	21%	21%	38%	20%
Impermeable (35%-50%)	20%	15%	35%	30%
Impermeable (75%-100%)	10%	5%	30%	55%

Fuente: (Pérez et al., 2020, p.167).

Debido a la variabilidad espacial de la capacidad de infiltración del suelo y a los factores involucrados en estos, existe un grado de dispersión entre los resultados de los ensayos in situ y los datos experimentales, que afecta al comportamiento de la capa superior del suelo en estado no saturado (Ariza et al., 2019, p.110). A continuación, se presentan algunos modelos de este tipo:

- **Ecuación de Horton:** comienza con una capacidad de infiltración y disminuye exponencialmente hasta obtener una tasa constante, define la ecuación para evaluar la capacidad de infiltración (Ponnada et al., 2020, p.88).
- **Método de Green – Ampt:** se define como la línea que separa el primer suelo húmedo del suelo ya saturado con un contenido de humedad igual a la porosidad. En un corto periodo de

tiempo tras el inicio de la infiltración, este frente ha alcanzado una profundidad.

- **Método del número de curva (CN):** establece que la precipitación efectiva es la que da lugar a la escorrentía superficial, que es siempre inferior a la precipitación total. La máxima retención potencial del suelo es igual a la suma del agua absorbida en la cuenca y las extracciones iniciales por interceptación y almacenamiento. Se realiza la siguiente igualdad:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (\text{Ec.3-2})$$

**Donde:**

***F<sub>a</sub>***: Agua infiltrada en la cuenca de estudio

***S***: Retención máxima potencial

***P<sub>e</sub>***: Precipitación efectiva

***P***: Precipitación total

***I<sub>a</sub>***: Pérdidas iniciales

Con la siguiente ecuación se verifica el principio de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (\text{Ec.4-2})$$

El número de la curva CN, que oscila entre 0 y 100 según el tipo de suelo, su uso y la situación hidrológica previa, es una función de la mayor retención potencial en la ecuación de la precipitación efectiva:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (\text{Ec.5-2})$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Ec.6-2})$$

A menudo se considera que las extracciones iniciales son el 20% de la capacidad máxima de retención, pero a efectos de un análisis de las cuencas urbanas, esto se determina por la cantidad de agua almacenada en las depresiones de la subcuenca (Monrabal-Martinez et al., 2018, p.59).

**Tabla 2-2:** Número de curva de escorrentía empleadas para cubiertas permeables

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada: sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
Con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89

Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hiervas	45	66	77	83
Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. Óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
Condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocio (85% de impermeabilidad)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeabilidad)	81	88	91	93

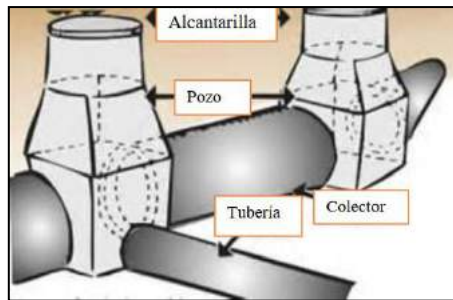
Fuente: (Gimenez y Breuste, 2020, p.70).

El CN es una propiedad del grupo hidrológico del suelo, que se divide en los cuatro grupos siguientes: A, B, C y D.

- **Grupo A.** Incluso cuando está húmedo, tiene un potencial limitado de escorrentía. Incluyen más del 90% de arena y/o grava y menos del 10% de arcilla. Estos suelos suelen tener texturas de arena o grava, aunque también pueden tener texturas más finas si tienen una estructura de agregados sólidos, una baja densidad aparente o más de un 35% de trozos de roca.
- **Grupo B.** Cuando están saturados, estos suelos tienen una moderada capacidad de infiltración. Incluyen del 50 al 90% de arena y del 10 al 20% de arcilla. Contienen texturas franco-arenosas, y si la estructura tiene excelentes agregados, una baja densidad aparente, o más del 35% de piezas rocosas, también pueden tener texturas más finas (García et al., 2021, p.120).
- **Grupo C.** Una vez saturados, estos suelos tienen poca capacidad de infiltración. Presentan menos del 50% de arena y del 20 al 40% de arcilla. Si en la estructura existe buenos agregados, mayor del 35% de estructuras rocosas y baja densidad aparente, posee texturas: franco-arcillosa, franca, franco-arcillo-limosa, franco-limosa, franco-arcillo-arenosa y arcillo-limosa.
- **Grupo D.** Cuando están completamente saturados de humedad, los suelos de este grupo tienen un alto potencial de escorrentía. El suelo tiene poca o ninguna circulación de agua a través de él. Incluyen menos del 50% de arena y más del 40% de arcilla (Houdeshel et al., 2015, p.49).

### 2.2.7. *Sistemas de drenaje urbano convencionales*

Con el fin de mejorar la calidad de vida de la población, a menudo se desarrollan sistemas de alcantarillado como parte de los servicios básicos que prestan los organismos gubernamentales. El sistema integrado por tuberías necesarios para aceptar y evacuar las aguas residuales de una determinada población se denomina red de alcantarillado sanitario (Roblero et al., 2019, p.134).



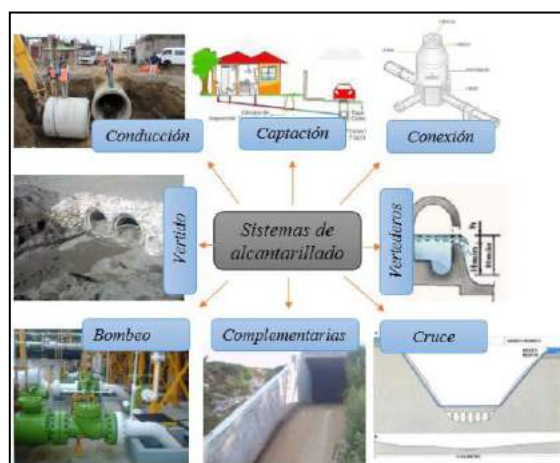
**Ilustración 6-2:** Sistema de drenaje.

Fuente: (Skala et al., 2020, p.81).

### 2.2.7.1. Componentes de un sistema de alcantarillado

Todo sistema de alcantarillado se compone principalmente de:

- Un sistema de tuberías o colectores (abiertos y cerrados).
- Estructuras hidráulicas anexas para su funcionamiento, mantenimiento y control (Monrabal-Martinez et al., 2018, p.59).



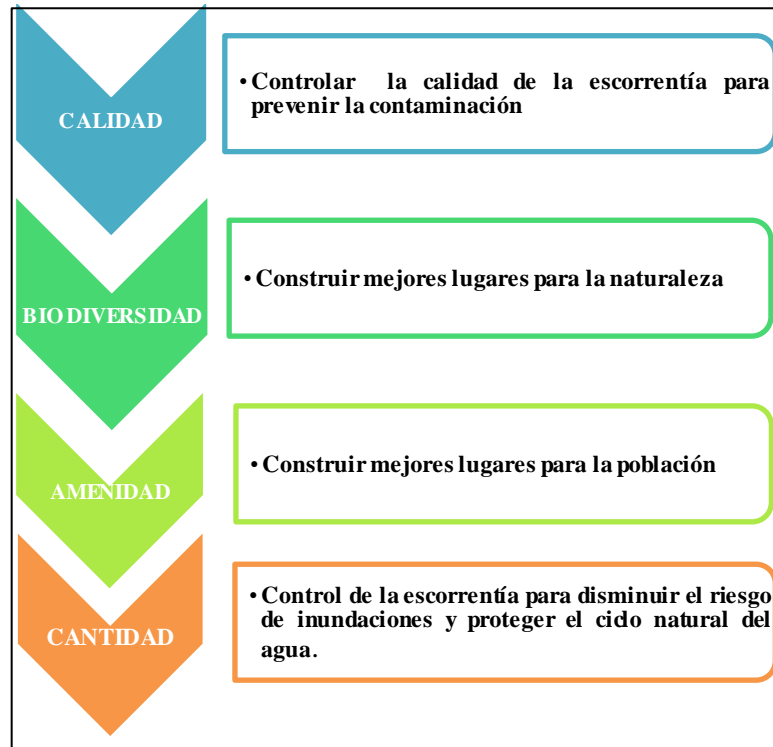
**Ilustración 7-2:** Componentes del sistema.

Fuente: (Yuan et al., 2019, p.24).

### 2.2.8 Sistemas sostenibles de drenaje urbano o LIDs

Los sistemas de drenaje urbano sostenible, también conocidos como LID (*Low Impact Developments*), son una alternativa a la renovación de los sistemas de drenaje urbano. Tienen una serie de ventajas sobre los métodos tradicionales, ya que tienen en cuenta no sólo la cantidad de agua de una cuenca, sino también su calidad, la biodiversidad y el paisaje. Esto demuestra el empeño por encontrar una solución holística al problema del drenaje urbano sin necesidad de provocar daños al paisaje (Skala et al., 2020, p.81).

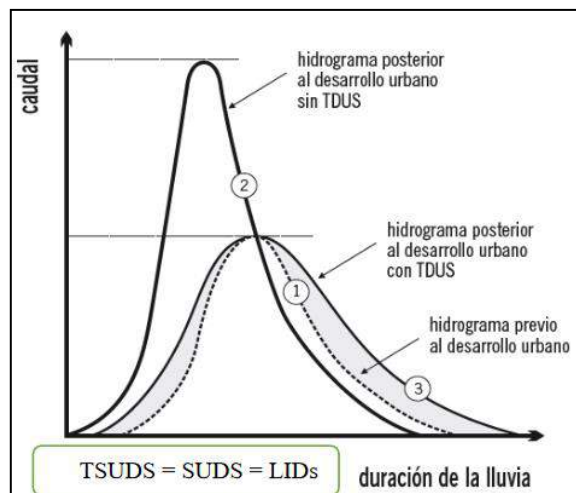
## DESARROLLO DE BAJO IMPACTO (LID)



**Ilustración 8-2:** Ejes principales del diseño de tecnologías LID.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Por esta razón, es fundamental modificar la filosofía de tratamiento del drenaje para dar prioridad a la protección de los procesos naturales del ciclo hidrológico en el mayor grado posible, al tiempo que se incorpora activamente a la sociedad en el esfuerzo por reducir la escorrentía y aprovechar la cantidad de lluvia (Roblero et al., 2019, p.134).

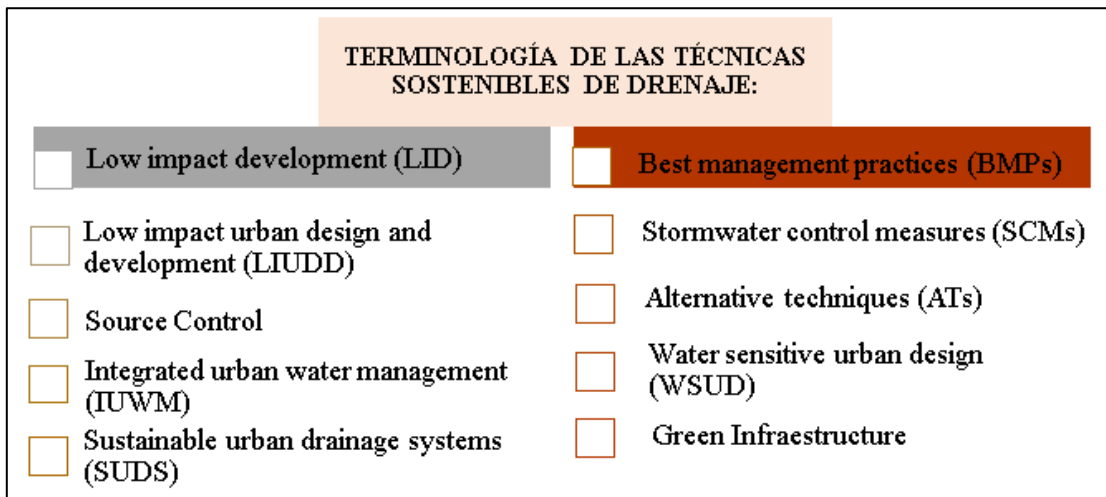


**Ilustración 9-2:** Sistemas LIDs en el hidrograma

Fuente: (Shafique y Luo, 2020, p.25).

- **Terminología**

Debido a la adopción simultánea de sistemas de drenaje urbano sostenible en varios países del mundo, este concepto se ha denominado con varios términos, cada uno con un significado diferente en función de la amplitud de las investigaciones y aplicaciones de campo que se han llevado a cabo en diversas partes del planeta (Yuan et al., 2019, p.24). Estos métodos de drenaje sostenible pueden recibir los siguientes nombres:



**Ilustración 10-2:** Terminología de las técnicas LID.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

### 2.2.8.1 Clasificación y tipos de medidas

Existen varios métodos para clasificar los numerosos enfoques de LID que existen en la actualidad, pero los expertos en la materia suelen estar de acuerdo en que las medidas estructurales y no estructurales deberían ser la principal división.

- **Medidas no estructurales:** Las medidas no estructurales son actos dirigidos a la sociedad con el objetivo de fomentar su participación en el control del drenaje urbano y el mantenimiento del ciclo del agua. Las intervenciones no estructurales más populares son:

- La educación.
- La elaboración de leyes y la planificación económica.

La ausencia de participación directa en la creación de infraestructuras de cualquier tipo o de actividades en la red existente define las medidas no estructurales. La primera etapa de la gestión sostenible de la escorrentía urbana podría incluir las siguientes: prevención de la escorrentía urbana y prevención de la red urbana (Simpson y Tirpak, 2021, p.135).



### ▪ **Medidas para minimizar la escorrentía**

- Reducir la cantidad de superficies pavimentadas en la ciudad para promover la infiltración y hacer que el comportamiento de la cuenca se acerque al de su estado natural, antes de la urbanización. Debido a que a menudo no hay espacio suficiente para ello en las regiones densamente pobladas, esta es una técnica muy eficaz, pero también es bastante difícil ponerla en práctica (Houdeshel et al., 2015, p.49).
- Dirigir la escorrentía hacia los espacios verdes ya existentes: Consiguiendo que estos espacios, por pequeños que sean, recojan la escorrentía de las regiones impermeables, de esta forma se puede aumentar el rendimiento de estos espacios verdes.
- **Medidas estructurales:** Por otro lado, las medidas estructurales son las que tienen algún aspecto constructivo, ya sea pequeño o grande. Son muy apreciadas y objeto de mucha investigación; serán un componente de la infraestructura para el drenaje urbano. La clasificación de las medidas estructurales no es única; no existe un acuerdo global que establezca normas, ya que muchos de los planteamientos tienen principios y funcionamientos similares que los hacen comparables (Roblero et al., 2019, p.134).

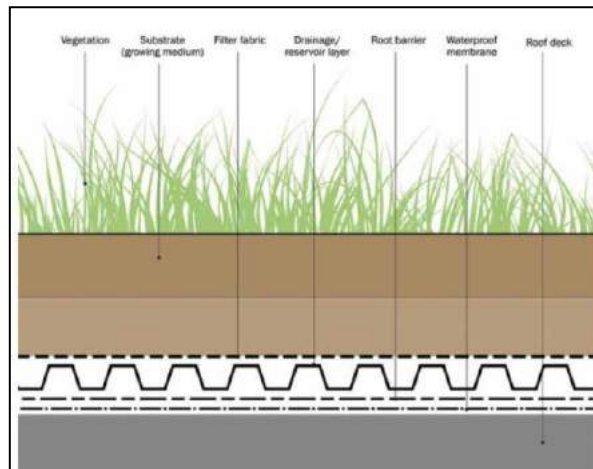
### ▪ **Tejados verdes**

Las cubiertas verdes, a veces denominadas "Green Roofs", son una forma de utilizar plantas en los tejados de los edificios para almacenar el agua de lluvia in situ. Sus ventajas van más allá del ámbito de la hidrología urbana y mejoran el funcionamiento eficaz del edificio en su conjunto. Los tejados y azoteas de las ciudades representan alrededor del 32% de su superficie total, por lo que los tejados verdes tienen un gran potencial para restaurar y mejorar la hidrología urbana. Se trata de un sistema multicapa instalado en los tejados de los edificios, con un sustrato en la capa superficial que favorece el crecimiento de plantas. Las múltiples capas cooperan entre sí para captar y retener la mayor cantidad de lluvia posible, a la vez que retienen las impurezas (Shafique y Luo, 2020, p.25).

La evapotranspiración a través de las plantas es una forma de eliminar parte del agua captada. Además, reducen los niveles de ruido, sirven de aislamiento térmico del edificio y contrarrestan el efecto "isla de calor" que se produce en las ciudades. Gracias a la capacidad de las plantas de adaptarse al sustrato mediante la evapotranspiración, el gasto energético puede disminuir. La cantidad de agua que pueda contener la cubierta determinará estas características. Los numerosos tipos de cubiertas verdes pueden clasificarse por:

- **Tejados extensivos:** Las cargas que debe soportar la estructura son menores ya que la capa de sustrato es fina (entre 2 y 15 cm). Se utilizan en una amplia gama de lugares ya que el tipo de vegetación a plantar es sencillo (herbácea o musgo) y las necesidades de cuidado son baratas. Es el tipo de cubierta que más se utiliza por estos factores. Pueden ser planas o

inclinadas y suelen ser inaccesibles (Rossman, 2015, p.63).



**Ilustración 11-2:** Elementos de la cubierta vegetal

Fuente: (Skala et al., 2020, p.81).

- **Tejados intensivos:** Con más de 15 cm de profundidad, la capa de sustrato tiende a sostener una amplia gama de vegetación, incluyendo algunos arbustos y pequeños árboles, sin embargo, necesitan un mantenimiento más continuo. Suelen utilizarse sólo en estructuras recién construidas debido al gran peso que ejercen sobre la estructura. Suelen ser accesibles. La cubierta vegetal y las propiedades de drenaje se obtienen superponiendo capas de diversos materiales para crear una cubierta verde (Simpson y Tirpak, 2021, p.135). Los elementos de estas capas variarán en función del tipo de cubierta verde y de las circunstancias regionales, pero suelen consistir en las capas que se enumeran a continuación, en orden creciente:
- **Membrana impermeable:** Evita que el agua de las capas superiores penetre en la estructura del edificio.
- **Membrana anti-raíces:** Protege la membrana impermeable de los daños causados por las raíces (Ponnada et al., 2020, p.88).
- **Capa de drenaje:** tiene como objetivo principal recoger las precipitaciones y canalizar el agua sobrante hacia la bajante del edificio. Puede crearse utilizando componentes modulares o sistemas laminares o una sustancia granular extremadamente porosa.
- **Geotextil:** Este material suele colocarse entre la capa de drenaje y el sustrato para evitar que las partículas de este último contaminen al primero. Tiene que ser muy poroso para no interferir con el sistema de filtración de agua (Muthanna et al., 2018, p.77).
- **Sustrato:** Es la capa de tierra que soporta el crecimiento de las plantas. El tipo de material seleccionado debe ser adecuado en términos de contenido nutricional, convenientemente permeable, resistente al calor, a la congelación y a la contracción.
- Vegetación.



**Ilustración 12-2:** Techo verde en “British Horse Society”.

Fuente: (Yuan et al., 2019, p.24).

- **Sistemas de infiltración**

Esta subcategoría de sistemas LID incluye una serie de componentes de drenaje urbano sostenible con el objetivo principal de fomentar la infiltración de la escorrentía urbana. Los pozos, las zanjas y los tanques de infiltración son los tres dispositivos de infiltración principales y más utilizados. Cada uno de ellos es una excavación en el suelo que se ha rellenado con una sustancia que tiene muchos huecos para almacenar la escorrentía de las superficies impermeables mientras se filtra en el suelo (Shafique y Luo, 2020, p.25).

- **Pozos de infiltración (“Infiltration soakaways”):** Se trata de pequeñas cuencas de retención que a menudo se construyen bajo los jardines en terrenos privados. Suelen almacenar temporalmente la escorrentía de los tejados. Las fosas de infiltración tienen una gran variedad de tamaños y formas, desde pequeñas fosas envueltas en geotextil y compuestas por componentes modulares o materiales granulares hasta fosas prefabricadas de hormigón perforado más grandes y cubiertas por un relleno granular (Houdeshel et al., 2015, p.49).
- **Las zanjas de infiltración (“infiltration trenches”):** Son pozos de infiltración dispuestos linealmente. Pueden ser menos profundos, más estrechos y estar abiertos a la superficie, lo que les da una ventaja sobre los pozos. El pozo puede estar totalmente sobre un material poco filtrante, mientras que éstos pueden dividir su área de diseño en una variedad de tipos de suelo. Los drenajes filtrantes son lo que generalmente se denomina zanjas filtrantes cuando se diseñan para transportar la escorrentía a otros sistemas de tratamiento importantes o al medio receptor directamente (Pérez et al., 2020, p.167).
- **Los depósitos o estanques de infiltración (“infiltration basins”):** Son depresiones a nivel del suelo creadas para retener las precipitaciones superficiales y permitir que se filtren en la tierra. Suelen estar cubiertas de vegetación y recogen la escorrentía de las superficies impermeables cercanas.



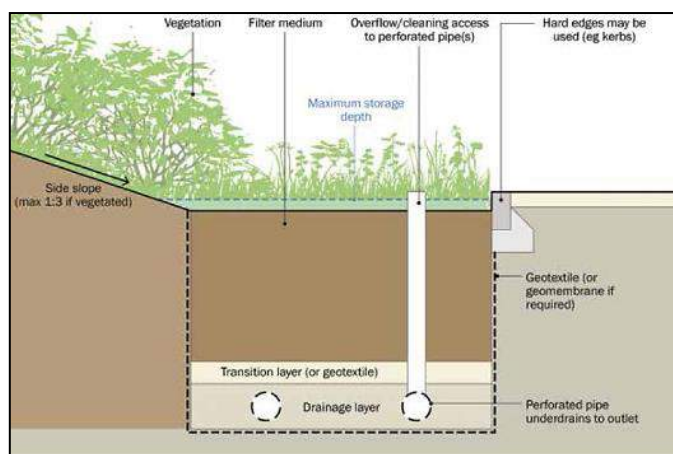
**Ilustración 13-2:** Zanja de infiltración profunda.

**Fuente:** (Rossman, 2015, p.63).

#### ▪ **Sistemas de bio-retención**

Los sistemas de biorretención multicapa, que suelen encontrarse en lugares algo bajos, permiten el almacenamiento, la infiltración y la eliminación de contaminantes mediante la utilización de suelos y plantas. Además, a diferencia de los sistemas de infiltración, proporcionan un hábitat, una biodiversidad y un enfriamiento del microclima circundante. Son bastante versátiles, ya que pueden adaptarse a diversos entornos urbanos (zonas comerciales, aparcamientos, aceras, etc.). Para adaptarlos a las condiciones de la cuenca, se pueden emplear diversas combinaciones de materiales, formas y dimensiones (Yuan et al., 2019, p.24). El diseño más típico consiste en elevar los siguientes estratos al rellenar una pequeña excavación:

- **Geotextil:** Evita que las partículas se introduzcan en los huecos del material poroso, separando la capa de drenaje tanto del suelo circundante como de la capa de sustrato. Puede ser sustituido por una sustancia de transición.
- **Capa de drenaje:** Hecha de grava u otro material poroso para servir de depósito para el agua que ha sido interceptada. Esto permite que las precipitaciones se filtren en el suelo. Los componentes modulares también pueden colocarse en esta capa si se necesita más espacio de almacenamiento (Shafique y Luo, 2020, p.25).
- **Tubos perforados:** Recogen y liberan en el sistema de alcantarillado el agua que se ha almacenado en la capa de drenaje. Son opcionales y sólo se utilizarán si la capacidad de infiltración del suelo circundante es insuficiente para manejar la precipitación de diseño.
- **Sustrato:** Una capa de suelo arenoso que soporta el crecimiento de las plantas. El tipo de material seleccionado debe ser apropiado en términos de contenido de nutrientes, convenientemente permeable, resistente al calor, a la congelación y a la contracción. Esta capa regula la eficacia del sistema dictando el ritmo de infiltración (Rossman, 2015, p.63).
- Vegetación.



**Ilustración 14-2:** Parte de un sistema de biorretención.

**Fuente:** (Simpson y Tirpak, 2021, p.135).

El jardín de lluvia es un tipo de dispositivo de bio-retención. Suelen utilizarse en terrenos privados y son de tamaño reducido. Su diseño es menos exacto, y las capas de drenaje y geotextil se eliminan por completo o se sustituyen por una fina capa de arena. Aunque el método de funcionamiento es similar al de los sistemas de biorretención tradicionales, las ventajas en términos de infiltración y atenuación de la escorrentía son mucho menores. Estos sistemas son atractivos, ya que proporcionan a los jardines privados modelos imaginativos, al tiempo que contribuyen al control de las aguas pluviales (Rossman, 2015, p.63).



**Ilustración 15-2:** Sistema de bio-retención

**Fuente:** (Hou et al., 2022, p.83).

#### ▪ Pavimentos permeables

Un área muy específica de estudio del enfoque LID son los pavimentos permeables, que pretenden sustituir las aceras y carreteras tradicionales por alternativas sostenibles. Proporcionan a las personas y a los coches un lugar por el que caminar y correr a la vez que permiten que las precipitaciones se desplacen verticalmente a través de ellos. Para ello cuentan

con una capa de pavimento permeable en la superficie, que ha sido objeto de investigación desde la década de 1970 (Bloorchian et al., 2016, p.70).

Una vez que el agua ha penetrado en esta capa, procede a filtrarse a través de una serie de capas inferiores similares a las que se ven en los sistemas de biorretención, incluyendo una capa de sustrato de arena y una capa de drenaje que llegan antes que el suelo natural. Para atenuar el pico del hidrograma de salida y disminuir la cantidad total de escorrentía, los pavimentos permeables constituyen una estrategia de gestión de fuentes LID. Lo hacen interceptando, reteniendo e infiltrando la escorrentía. Hay dos formas diferentes de crear un pavimento permeable:

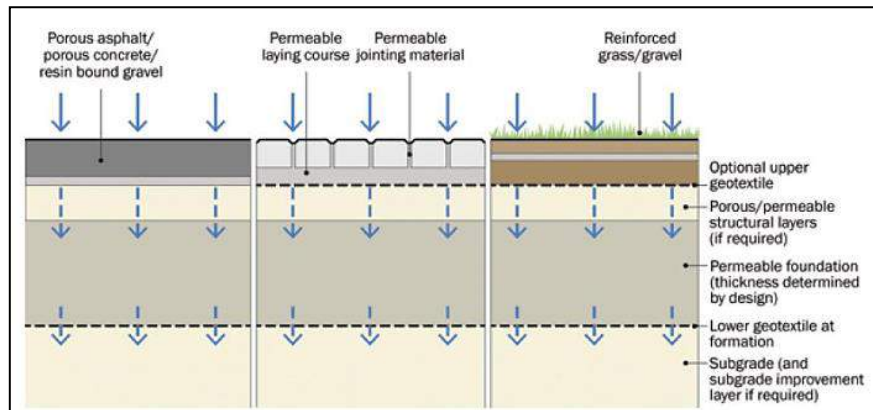
- **Pavimentos porosos:** A través de todo el material de la superficie, infiltra el agua.
- **Pavimentos permeables:** Aunque tiene un revestimiento impermeable, hay huecos entre los bloques de material que permiten el paso del agua.

Dependiendo de los materiales de construcción utilizados, existen diversas variedades de pavimentos permeables dentro de cada uno de estos dos procesos. A continuación, se enumeran algunas de ellas:

- **Pavimentos permeables modulares:** Para permitir que el agua se desplace a las capas inferiores, incluyen la pavimentación de la superficie con bloques de hormigón, roca natural, arcilla, etc. y dejan amplios huecos entre ellos que se rellenan con material granular. Se utilizan en puertos, zonas peatonales, áreas de aparcamiento, etc (Peng y Stovin, 2017, p.40).
- **Asfalto poroso:** Al eliminar las partículas de la mezcla, este tipo de asfalto tiene una mayor proporción de poros. Es tan permeable que el agua puede atravesarlo sin dejar de ofrecer cierta resistencia. Además, disminuye el ruido del tráfico. Puede utilizarse en aparcamientos, entradas de vehículos, parques, escuelas, carreteras de tráfico, entre otros lugares.
- **Césped reforzado:** El uso de sustrato sembrado de césped o sólo de grava en sustrato relleno de hormigón o mallas de polímero. Su ventaja sobre los pavimentos modulares es que tienen un mayor porcentaje de superficie permeable. Sólo se utilizan en aparcamientos, caminos y escuelas (Bloorchian et al., 2016, p.70).
- **Grava fijada con resina:** Se utiliza en lugares con menos tráfico, como escuelas, carreteras, etc., y tiene un aspecto agradable a la vista.
- **Hormigón poroso:** Esta forma particular de hormigón tiene una alta proporción de poros que permite que el agua fluya a través de ella, pero manteniendo un cierto nivel de resistencia ya que las arenas más finas no se incluyen en la mezcla. Se utiliza en aparcamientos y lugares con poco tráfico (Simpson y Tirpak, 2021, p.135).
- **Pavimento de bloques porosos:** Los bloques de este tipo particular de pavimento modular permeable están formados por hormigón poroso, lo que no es habitual. Estos a su vez, en lugar de entrar por las juntas, prefieren penetrar en el propio hormigón. Debido a su mayor riesgo



de obstrucción, como demuestra la experiencia, su uso es más limitado.



**Ilustración 16-2:** Esquema de diferentes tipos de pavimento permeable.

Fuente: (Conley et al., 2020, p.69).

Al igual que los sistemas de biorretención, los tubos perforados en la capa de drenaje son una alternativa para los pavimentos permeables con el fin de eliminar el agua sobrante que el suelo natural no es capaz de absorber. Además, en esta situación no es deseable que el agua se acumule en la superficie. Los sistemas híbridos entre los pavimentos permeables y los convencionales, que permiten hacer más práctica la restauración de los pavimentos existentes en los centros urbanos, son otra alternativa intrigante que proporcionan los pavimentos permeables (Nkwunonwo y Baily, 2020, p.51).



**Ilustración 17-2:** Superficie de césped reforzada en Barcelona.



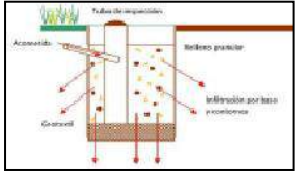
Fuente: (Joshi et al., 2021, p.73).

Las siguientes medidas estructurales son las más comunes:

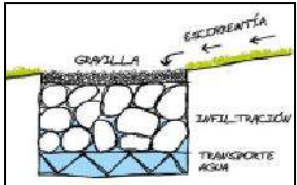


- Sistemas de control en origen o de infiltración
- Sistemas permeables de transporte
- Sistemas comunes



- Sistemas de tratamiento pasivo.


**Tabla 3-2:** Medidas estructurales LID.

<b>MEDIDAS ESTRUCTURALES</b>			
<b>Sistemas de infiltración</b>	Superficies permeables	Pavimentos que permiten que el agua corra a través de ellos, creando la posibilidad de que se filtre a la tierra o sea captada y almacenada en capas subterráneas para ser reciclada posteriormente o desechada (Peng y Stovin, 2017, p.40). Existen diversas variedades, como el césped o la grava, pavimentos continuos porosos (resinas, asfalto, etc.), bloques impermeables con costuras permeables y baldosas porosas.	 <p><b>Ilustración 18-2:</b> Superficies permeables Fuente: (Czemiel, 2010, p.91).</p>
	Depósitos de infiltración	Son depósitos poco profundos o depresiones del terreno destinados a retener y hacer penetrar progresivamente el agua de lluvia de las superficies cercanas (Legates, 2007, p.88). Al eliminar los contaminantes mediante filtración, adsorción y transformaciones biológicas, la función de estos embalses es convertir el flujo superficial en flujo subterráneo.	 <p><b>Ilustración 19-2:</b> Depósitos de infiltración Fuente: (Czemiel, 2010, p.91).</p>
	Pozos y zanjas de infiltración	Zanjas y pozos poco profundos (de 1 a 3 m) que se rellenan con material drenante sintético o granular y en los que se traslada la escorrentía procedente de las superficies impermeables	 <p><b>Ilustración 20-2:</b> Pozo de infiltración Fuente: (Czemiel, 2010, p.91).</p>



		<p>cercanas. Se pretende que sean estructuras de infiltración que puedan absorber completamente la escorrentía producida por la tormenta de diseño (Legates, 2007, p.88).</p>	
<b>Sistemas de transporte permeable</b>	<p>Drenes Filtrantes o franceses</p>	<p>Zanjas poco profundas, con o sin tubo de conducción inferior, rellenas de material filtrante, destinadas a recoger y filtrar la escorrentía procedente de las superficies impermeables cercanas y transportarla después aguas abajo. También pueden dejar que las cantidades de escorrentía se infiltren y laminen (Yuan et al., 2019, p.24).</p>	 <p><b>Ilustración 21-2:</b> Drenes filtrantes <b>Fuente:</b> (Czemiell, 2010, p.91).</p>
	<p>Franjas Filtrantes</p>	<p>Entre una superficie dura y el medio receptor de la escorrentía (sistema de captación o curso de agua), hay amplias franjas de suelo con vegetación, de suave pendiente. Éstas favorecen la infiltración y la disminución de la escorrentía, así como la sedimentación de partículas y contaminantes transportados por el agua (Rossman, 2015, p.63).</p>	 <p><b>Ilustración 22-2:</b> Franja filtrante <b>Fuente:</b> (Czemiell, 2010, p.91).</p>
	<p>Cunetas verdes</p>	<p>La escorrentía superficial está pensada para ser almacenada y transportada en estructuras vegetales lineales de base ancha (&gt; 0,5 m) con una pendiente plana (1V:3H). Deben proporcionar velocidades bajas (1-2 m/s) que contribuyan la</p>	 <p><b>Ilustración 23-2:</b> Cuneta verde <b>Fuente:</b> (Czemiell, 2010, p.91).</p>

		<p>eliminación eficaz de la contaminación mediante la sedimentación de partículas. También pueden permitir la filtración en estratos más profundos.</p>	
<p><b>Sistemas de tratamiento pasivo</b></p>	<p>Depósitos de detención</p>	<p>Los depósitos de superficie diseñados para absorber los caudales máximos almacenando temporalmente las cantidades de escorrentía producidas aguas arriba (Hou et al., 2022, p.83). Contribuyen a la sedimentación, lo que disminuye la contaminación. Pueden situarse en "zonas muertas" o en conjunción con otros usos, como las actividades recreacionales en parques y recintos deportivos.</p>	 <p><b>Ilustración 24-2:</b> Diseño de depósito de detención <b>Fuente:</b> (Czemieli, 2010, p.91).</p>
	<p>Estanques de retención</p>	<p>Las cuencas pueden hacerse aprovechando una depresión natural o excavando una; son cuencas con un almacenamiento permanente de agua. Cuando llueve, la escorrentía es captada y procesada por adsorción biológica y sedimentación antes de ser desplazada por la siguiente tormenta. La cámara de sedimentación, el depósito permanente, el volumen de almacenamiento temporal y la zona poco profunda son sus cuatro zonas diferenciadas</p>	 <p><b>Ilustración 25-2:</b> Estanque de retención <b>Fuente:</b> (Czemieli, 2010, p.91).</p>

		(Pérez et al., 2020, p.167).	
	Humedales	Tienen un enorme potencial ecológico, educativo, estético y recreativo. Son similares a las anteriores, pero menos profundas y con mayor densidad de vegetación emergente (Krause y Base, 2005, p.47).	 <p><b>Ilustración 26-2.</b> Humedales Fuente: (Czemiel, 2010, p.91).</p>

Fuente: (Houdeshel et al., 2015, p.49).

Para lograr uno de los objetivos de las técnicas de LIDs, a saber, la promoción de una mejor calidad de vida mediante la concepción de entornos más cálidos, naturales y agradables en las ciudades, las LIDs deben aplicarse en función del área disponible en la urbanización (Nkwunonwo y Baily, 2020, p.51).

#### 2.2.8.2. Características de las tecnologías LID

Los procesos de infiltración, retención y evapotranspiración se combinan en los LID, específicamente para minimizar la escorrentía superficial en las vías de comunicación y así restaurar la hidrología urbana a la del entorno natural. Los LID pueden ser superficiales o subterráneos, tener o no vegetación, etc. Son totalmente compatibles con las técnicas tradicionales de drenaje urbano y pueden funcionar en perfecta armonía con las redes de alcantarillado ya existentes. Aunque en un principio los LID están pensados para favorecer una gestión más eficaz y sostenible de las aguas pluviales, también se pretende que acaben ocupando el papel de las redes tradicionales de alcantarillado subterráneo:

- Mejorar y salvaguardar el ciclo del agua en los entornos urbanos para salvaguardar los sistemas naturales (Hou et al., 2022, p.83).
- Incorporar el tratamiento de las aguas pluviales en el paisaje: Al mejorar el paisaje con la incorporación de cauces y/o láminas de agua en el entorno, se puede optimizar el servicio a las personas.
- Reducir los volúmenes de escorrentía y los caudales máximos utilizando elementos de retención y reduciendo la cantidad de superficies impermeables en las regiones urbanas (Hou et al., 2022, p.83).
- Aumentar el valor adicional al tiempo que se reducen los gastos: Reducir los costes de las infraestructuras de drenaje al tiempo que se aumenta el valor medioambiental.

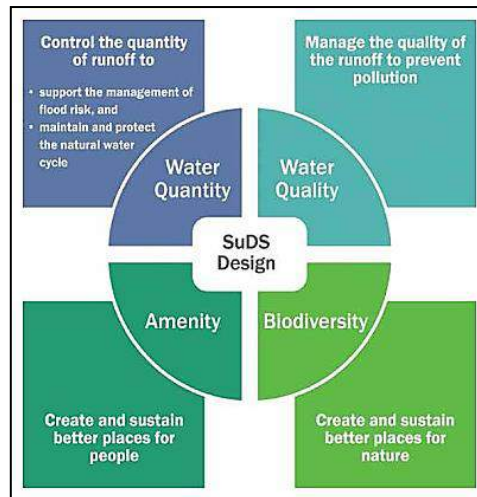
### 2.2.8.3. *Gestión jerarquizada*

Existe una jerarquía para el mejor uso de las soluciones de drenaje urbano sostenible, aunque la teoría de LID es la misma independientemente de la magnitud de la actividad. Para sacar el máximo provecho de las técnicas utilizadas, la gestión de las aguas pluviales debe hacerse en muchos niveles:

- **Prevención:** La prevención es lo primero en la jerarquía de la gestión. Pueden evitarse problemas futuros y ahorrarse esfuerzos innecesarios adoptando medidas legislativas, de inspiración, de promoción y de otro tipo para aumentar el conocimiento del público sobre la limpieza, la reducción de emisiones y el uso del agua (Rossman, 2015, p.63).
- **Gestión en origen:** En general, es más ventajoso recoger la escorrentía en el lugar de generación o muy cerca de él. Cerca del punto de caída, donde hay menos agua que recoger y menos posibilidades de contaminación, LID recoge el agua. El control de la fuente, que se lleva a cabo mediante procedimientos de LID generalizados en terrenos privados, es más adecuado en las regiones urbanas, donde el espacio accesible es escaso y difícil de conseguir.
- **Gestión en el entorno urbano:** La escorrentía que no ha sido tratada en origen se controla a un nivel más general en los entornos urbanos, ya sea mediante diversos sistemas LID que no actúan en origen o mediante las redes de alcantarillado tradicionales. En esta etapa, los objetivos son reducir la descarga y la velocidad de escorrentía (Simpson y Tirpak, 2021, p.135).
- **Gestión de la cuenca hidrográfica:** La gestión de toda la cuenca es la última etapa. El objetivo es tener una perspectiva amplia de la gestión de las aguas pluviales para que se tenga en cuenta toda la escorrentía producida. Dado que se trata de la última etapa de tratamiento antes de que los flujos se liberen en el medio ambiente, es necesario emplear este análisis de gestión (Legates, 2007, p.88).

### 2.2.8.4. *Beneficios de las técnicas LID*

La aplicación de los enfoques LID debe centrarse siempre en maximizar las ventajas para la ciudad y sus operaciones a través del control de la escorrentía superficial. En general, el CIRIA propone en su manual una división de las mismas en cuatro categorías: beneficios en el control de la cantidad de agua, en la gestión de la calidad de la escorrentía para evitar la contaminación, en la creación y mantenimiento de mejores lugares para ofrecer a los ciudadanos, y en la creación y mantenimiento de lugares más respetuosos con la naturaleza. Los beneficios que se pueden conseguir con la aplicación de los LID son muy variados y dependerán de numerosos factores locales y de diseño (Kwak y Han, 2016, p.30).



**Ilustración 27-2:** Pilares básicos LIDs.

Fuente: (Joshi et al., 2021, p.73).

- **Cantidad de agua**

El objetivo principal de esta investigación es emplear las LID como herramienta para proteger a la ciudad y a sus habitantes contra las peligrosas inundaciones. Es importante conocer las causas, los mecanismos y las respuestas históricas a los problemas de inundación de las ciudades. Por lo tanto, si se desea disminuir el impacto de las inundaciones en diferentes regiones, es necesario tener en cuenta principalmente dos factores:

- El pico del hidrograma de salida, que indica la rapidez con la que la escorrentía sale del sistema de drenaje pluvial.
- La cantidad total de escorrentía liberada (Hou et al., 2022, p.83).

Hay que intentar reproducir un hidrograma de salida de la escorrentía que se asemeje al que se observa en las cuencas naturales, ya que el objetivo es restaurar la hidrología local antes del desarrollo urbano. Las estrategias de LID se han diseñado y construido de forma que puedan controlar el volumen y la velocidad de la escorrentía en función de los factores geológicos y climáticos de cada lugar. Las estrategias de LID permiten revertir algunos de los impactos negativos de la urbanización de una cuenca natural en la hidrología regional, promoviendo la recuperación de los acuíferos, preservando el suministro de agua subterránea a los ríos y arroyos, minimizando la erosión aguas abajo, etc.

Los enfoques LID atenúan e infiltran esencialmente el flujo de agua para lograr los dos objetivos mencionados anteriormente. Al mantener parte del volumen de agua precipitada después de su caída, se puede atenuar la escorrentía. La mayoría de los componentes de LID están equipados con capas que pueden captar parte de la lluvia que cae en otras zonas del pavimento, así como el agua que cae directamente sobre ellas. De este modo, la escorrentía en las calles se reduce y ralentiza mientras llueve, y posteriormente se libera con el caudal adecuado en la red de recogida subterránea (Joshi et al., 2021, p.73).

- **Calidad del agua**

Para salvaguardar las masas de agua receptoras y la flora y la fauna relacionadas, los LID pueden limpiar y tratar la escorrentía superficial en las zonas urbanas. Podemos evitar la mayor parte de la contaminación de las vías fluviales receptoras si tratamos el agua en su origen, es decir, antes de que pueda fluir por las calles, lo cual es uno de los beneficios de tratar la contaminación mediante LID, que no existe si nos limitamos a tratar la escorrentía en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales. Las técnicas de gestión in situ son fáciles de utilizar, pero deben desarrollarse con una perspectiva amplia para evaluar su impacto total en la cuenca.

Los gastos de este tipo de trabajo se reducen al disminuir el volumen de agua que procesan las instalaciones de tratamiento de aguas residuales (Hou et al., 2022, p.83). Los LID realizan este trabajo a través de una sofisticada interacción de componentes biológicos, químicos y físicos. A continuación, se describen algunos de los mecanismos a través de los cuales los enfoques LID pueden retener y/o eliminar los contaminantes producto de la escorrentía:

- **Adsorción:** es el proceso por el cual los átomos, o moléculas son capturados o retenidos en la superficie de un determinado material. En este contexto, la adsorción se refiere al fenómeno por el cual un contaminante se elimina del agua al entrar en contacto con un medio poroso, plantas o partículas en suspensión.
- **Sedimentación:** A medida que la velocidad del flujo de agua disminuye, los sólidos en suspensión transportados por los sedimentos de la escorrentía urbana entran en los sistemas de drenaje sostenible. La alta velocidad que alcanza el agua en los colectores arrastra históricamente los sedimentos incluidos en el agua de escorrentía hacia la masa de agua receptora. (Bloorchian et al., 2016, p.70).
- **Filtración:** Este es el procedimiento de clasificación que tiene lugar mientras el agua se mueve a través de un medio poroso. La obstrucción creciente del medio poroso, que necesita un mantenimiento continuo, es lo contrario de este proceso. Los materiales fabricados con geotextiles también ayudan en este proceso.
- **Biofiltración:** Es el proceso por el cual la escorrentía es filtrada biológicamente al pasar por las plantas. A través de su contacto con la vegetación, que tiene estructuras vegetales que capturan la materia en suspensión, el agua de lluvia se limpia. La densidad de la vegetación afectará a su eficacia (Yuan et al., 2019, p.24).
- **Biodegradación:** Es el proceso por el cual un material se descompone naturalmente bajo la influencia de agentes biológicos. Los microorganismos participan en los procesos de descomposición de los contaminantes, como la nitrificación, la desnitrificación, la precipitación y la descomposición de los materiales orgánicos.
- **Precipitación:** La formación de precipitados insolubles en el agua y que da lugar a su deposición. Puede ocurrir de forma instantánea o adsorbiendo primero los materiales

solubles y depositándose después. Depende del pH del agua, la dureza, etc.

- **Bioacumulación:** Es el proceso de integración parcial de una sustancia química en los seres vivos. Los metales pesados, los nutrientes y otros contaminantes pueden bioacumularse en las plantas. Lo importante es la duración de la interacción del contaminante con la planta, especialmente con la raíz (Hou et al., 2022, p.83).
- **Volatilización:** Durante el tratamiento LID, ciertas sustancias, particularmente las relacionadas con el petróleo y algunos pesticidas, pueden transformarse en gases (Rossman, 2015, p.63).

#### • **Biodiversidad**

Acercar la ciudad y sus habitantes a la naturaleza es la función que cumplen los LID a nivel de biodiversidad. La incorporación de enfoques LID da lugar a la creación de nuevos hábitats, así como a la rehabilitación o promoción de los existentes, y los eco sistemas resultantes proporcionan un entorno próspero y estimulante. El agua que los componentes LID mantienen se convierte en un recurso importante para la ciudad y es necesaria para el crecimiento y desarrollo de una diversa gama de animales y plantas. Cualquier plan o diseño de LID beneficia a la biodiversidad, pero el valor extra lo ofrecen las estrategias de LID que se integran en grandes espacios verdes, ya que pueden proporcionar hábitat y conexión para la vida animal (Bach et al., 2013, p.42).

Sin embargo, teniendo en cuenta que las regiones costeras mediterráneas son compactas, muy impermeables y con cuencas hidrográficas limitadas, ésta será una de las cuestiones más difíciles de conseguir. Así pues, los LID pueden ofrecer refugio, alimento y posibilidades de reproducción a una amplia gama de especies, como plantas, anfibios, invertebrados, aves y ciertos mamíferos, con un diseño correcto que tenga en cuenta su importancia ecológica (Bergeson et al., 2022, p.81).

En definitiva, un diseño que favorezca la mejora de los beneficios de la biodiversidad de los LIDs proporcionará las siguientes ventajas:

- Apoyar y preservar el entorno natural de la fauna local.
- Permite la consecución de los objetivos regionales de biodiversidad previstos en los marcos y planes de acción.
- Apoyar la conexión del hábitat entre los espacios verdes urbanos.
- Desarrollo de ecosistemas diversificados, robustos y autosuficientes (Bach et al., 2013, p.42).

#### • **Calidad de vida**

El objetivo del diseño urbano es proporcionar entornos urbanos estéticamente agradables, funcionalmente útiles y habitables que beneficien y mejoren la comunidad. La gestión del agua es una actividad esencial que contribuye al desarrollo de entornos habitables, ya que es un componente del entorno urbano. Sin embargo, la impresión del público sobre el trabajo realizado

en la gestión de los sistemas de drenaje urbano no siempre ha sido tan favorable como la de otros campos relacionados con la planificación urbana. Esto se debe al hecho de que es un reto para los ciudadanos entender la voluntad política y la capacidad técnica que permiten una red de colectores que se encuentra oculta en el subsuelo y cuya propia naturaleza no contempla el contacto directo con los ciudadanos, lo que dificulta la valoración de su buen funcionamiento. Por el contrario, una debilidad en dicho funcionamiento suele llamar la atención de los ciudadanos, lo que a su vez estimula la conciencia administrativa en la búsqueda de respuestas (Burbano y Pasquel, 2015, p.145).

El agua sigue siendo un recurso importante, y los enfoques LID pueden ayudar a controlar las aguas pluviales y la escorrentía en las cuencas urbanas, lo que cambiará la forma en que la gente ve el diseño urbano. Al fomentar la salud, el bienestar y las infraestructuras sostenibles, el uso de sistemas de drenaje urbano sostenible para ayudar a construir el entorno urbano aumenta su valor estético y recreativo. La gestión de la escorrentía superficial puede repercutir en la economía local y en la comunidad en general, al tiempo que contribuye a reducir las temperaturas estivales y sirve como recurso para las iniciativas de educación ambiental. El agua puede hacerse audible y visual gracias a los LID. Al igual que ocurre con la biodiversidad, las ventajas aumentarán si los LID se incluyen dentro de una gran zona verde (Burbano y Pasquel, 2015, p.145).

Por lo tanto, los LID ofrecen un potencial para muchos usos y contribuyen al desarrollo de comunidades habitables y, en última instancia, de la calidad de vida. Las siguientes son algunas de las ventajas de los LID para la calidad de vida:

- Mejor calidad del aire, ya que el agua y las plantas que contienen eliminan las partículas del aire de la calle.
- Debido al cambio climático, las temperaturas extremas se convertirán en un gran problema. El agua que contienen ayuda a regular estas condiciones.
- Reducir las emisiones de carbono: Los suelos y las plantas que albergan absorben y almacenan el CO<sub>2</sub>, así como otros gases de efecto invernadero. En varios puntos de la cadena de suministro y del ciclo de vida, los sistemas LID utilizan menos energía que los sistemas de drenaje tradicionales. Se puede ahorrar energía reciclando el agua almacenada (Ariza et al., 2019, p.110).
- Restauración de ecosistemas vulnerables: Las zonas con déficit de recursos hídricos debido a la sobreexplotación revalorizan el entorno urbano mediante la restauración de acuíferos y humedales en riesgo.
- Cohesión de la comunidad: Las personas tienen más probabilidades de experimentar un sentimiento de comunidad y orgullo por su zona gracias a la ampliación de las posibilidades de compromiso social y al desarrollo de entornos recreativos (Fan et al., 2019, p.211).
- Economía e inversión: La inversión tiende a ser atraída por lugares atractivos. Los lugares atractivos suelen aumentar la productividad. Se ha demostrado que los LID aumentan el



valor de las viviendas y los terrenos cercanos. También pueden despertar la curiosidad por viajar.

- Educación: Proporcionan muchas oportunidades para difundir el respeto al medio ambiente en la sociedad en general y en las escuelas.
- Salud y bienestar: Proporcionan zonas de ocio y relajación, preservando el bienestar físico y emocional (Fan et al., 2019, p.211).
- Reducción del ruido: Algunos LID proporcionan superficies y barreras que absorben el sonido.
- Las ventajas del drenaje urbano sostenible mediante el uso del principio rector de la técnica LID parecen ser muchas y extensas. En resumen, los LIDs colaboran para conseguir una interacción favorable entre los proyectos residenciales y el entorno en el que se proyectan desde sus respectivos ámbitos de actuación. Suman su talento a la gestión eficaz de los recursos naturales en un esfuerzo por aminorar los efectos adversos de la urbanización.

#### *2.2.8.5. Inconvenientes de las técnicas LID*

A pesar de las numerosas ventajas que supone la implantación progresiva de sistemas de drenaje sostenible en las ciudades y de los importantes avances logrados en su investigación, este ámbito sigue siendo, en su mayor parte, inexplorado. A pesar de los importantes estudios realizados en las últimas décadas, aún no se ha podido afirmar de forma inequívoca que estos enfoques relativamente nuevos puedan realmente sustituir a las redes de drenaje urbano tradicionales. Hay casos en los que funcionan muy bien, pero también hay casos documentados en los que no cumplen las expectativas (Burbano y Pasquel, 2015, p.145).

La desventaja de la que parten todos los demás y que inhibe su amplia adopción es, concretamente, la relativa inexperiencia con ellos, entre los cuales se tiene:

- Luego de largos periodos de tiempo en ejecución de los enfoques LID, se conoce muy poca información y datos sobre los mismos.
- Hay una escasez de conocimientos sobre los procedimientos necesarios para llevar a cabo su construcción correctamente.
- Si el nivel freático está cerca de la superficie o en terrenos con fuerte pendiente, su uso está restringido (Gimenez y Breuste, 2020, p.70).
- Debido a cuestiones muy particulares como las relacionadas con la obstrucción del medio poroso, es muy posible que los gastos de mantenimiento aumenten con el tiempo.
- Las guías de buenas prácticas específicas de LID son difíciles de conseguir y no se distribuyen con frecuencia (Gimenez y Breuste, 2020, p.70).

- Los costes pueden aumentar como consecuencia de su seguimiento y análisis.
- La mayoría de los modelos de gestión del drenaje pluvial urbano que se utilizan en la actualidad no están equipados para representar adecuadamente los procedimientos LID con el fin de evaluar su eficacia (Cárdenas y Jaramillo, 2017, p.69).

Todas estas cuestiones generan escepticismo sobre los LID e impiden la ejecución de proyectos de drenaje urbano sostenible. La siguiente comparación entre un sistema LID y un sistema de drenaje convencional pone de relieve las ventajas del drenaje sostenible, al tiempo que omite el subdesarrollo de estos sistemas:

**Tabla 4-2:** Cuadro comparativo entre los sistemas de drenaje convencional y sistemas alternativos LID.

	Sistema de colectores	LIDs
Coste de construcción	Puede ser equivalente pero el potencial de uso multifuncional de los LIDs puede reducir el coste global	
Coste de operación y mantenimiento	Establecido	Poco claro para algunos sistemas: se requiere investigación adicional
Control de inundaciones en origen	Si	Si
Control de inundaciones y erosión aguas abajo	No	Si
Potencial para reutilización del agua	No	Si
Potencial para recarga de acuíferos	No	Si
Potencial para eliminación de contaminantes	Bajo	Alto
Beneficios educacionales	No	Si
Funcionamiento a lo largo de la vida útil	Establecido	No establecido para algunos sistemas: se requiere investigación adicional
Espacio en superficie requerido	No significativo	Depende del tipo de sistema: varía entre significativo y substancial
Criterios de diseño	Establecido	No establecido para algunos sistemas: se requiere investigación adicional.

Fuente: (Ponnada et al., 2020, p.88).

### 2.2.8. *Infraestructura verde*

Con el fin de ofrecer una variedad de servicios ecosistémicos y salvaguardar la biodiversidad tanto en poblaciones rurales como urbanas, la infraestructura verde es una red deliberadamente planificada de regiones naturales y seminaturales y otros aspectos ambientales. Las mencionadas opciones de infraestructura verde reciben varios nombres, como mejores prácticas de gestión, desarrollo de bajo impacto, sistemas de drenaje urbano sostenible y otros. Pero siguen esforzándose por disminuir los efectos nocivos de la escorrentía de las aguas pluviales en las zonas urbanas mediante una estrategia novedosa de tratamiento de las aguas pluviales. Las infraestructuras verdes (GI) son estrategias basadas en la naturaleza que integran la escorrentía urbana, el control de la contaminación, el paisajismo para ofrecer mejores alternativas de gestión de las aguas pluviales urbanas (González y Ramírez, 2017, p.19).

Sus objetivos principales son reducir el volumen de las aguas pluviales y mejorar la calidad de las aguas superficiales, además de ofrecer otras ventajas medioambientales, monetarias y sociales. Se trata de una alternativa de gestión de las aguas pluviales que recoge, filtra y retiene el agua de lluvia al tiempo que minimiza las inundaciones y mejora la calidad del agua para salvar la vida acuática y aumentar la resiliencia (Ariza et al., 2019, p.110). El uso de plantas, suelos y procesos naturales para gestionar el agua y producir entornos urbanos más saludables se conoce como infraestructura verde.

En las ciudades con sistemas combinados de alcantarillado y drenaje pluvial, un fuerte aguacero supera la capacidad de tratamiento de los efluentes combinados, lo que provoca su vertido a los cursos de agua sin tratamiento. El agua de lluvia se evita que entre en el sistema de drenaje con el uso de la infraestructura verde. Ésta imita los procesos naturales al absorber y almacenar el agua. Pero también ofrece ventajas adicionales, como una mejor calidad del aire y un menor impacto de la isla de calor (Ariza et al., 2019, p.110).

#### *2.2.9.1. Zonas verdes urbanas y servicios ecosistémicos*

Las consecuencias perjudiciales de la urbanización pueden revertirse mediante la restauración ecológica de la infraestructura verde urbana. En este sentido, los ecosistemas seminaturales que pueden proporcionar servicios ecosistémicos como:

- Mejorar la calidad del aire o del agua.
- Controlar la escorrentía y las inundaciones.
- Control del microclima.
- Fomentar la conexión ecológica y la biodiversidad.

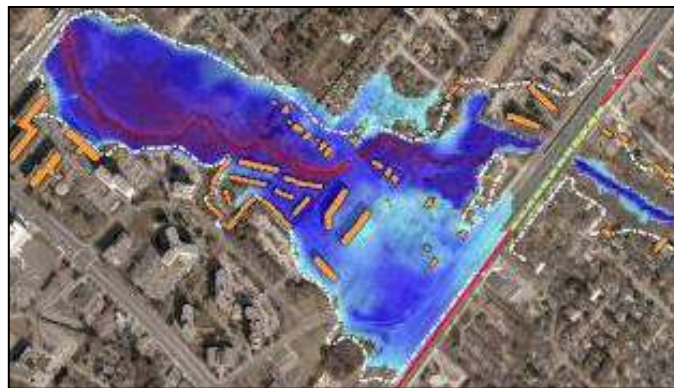
La población se beneficia directamente cuando se restauran estas funciones ambientales en los entornos urbanos. Pero las ventajas sociales van más allá. La renaturalización de las zonas urbanas permite a la sociedad restablecer su relación con la naturaleza. Esto promueve la solidaridad social y la educación sobre el valor de los ecosistemas para el beneficio humano (Ordoñez, 2011, p.11). La restauración de la infraestructura verde urbana fomenta el crecimiento económico dado que:

- Mejora el paisaje, lo que puede llevar a la creación de nuevas atracciones turísticas.
- Aumenta el valor de la propiedad de la tierra.
- Puede incluir la producción alimentaria o de otras materias primas.
- Ayuda a la creación de puestos de trabajo.

### **2.2.10 Modelación hidrológica- hidráulica en EPA SWMM 5.2.1**

#### **2.2.10.1 SWMM (Storm Water Management Model)**

El modelo de gestión de aguas pluviales (SWMM) de la Agencia de Protección del Medio Ambiente es un modelo de tipo dinámico de simulación de precipitaciones que puede utilizarse para un solo evento o para una simulación continua durante un largo periodo de tiempo. La herramienta permite simular la calidad y la cantidad de agua vertida, sobre todo en las alcantarillas urbanas (Houdeshel et al., 2015, p.49). El módulo de escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie de cuencas donde se produce la escorrentía y se acumula la precipitación. El módulo de transporte hidráulico de SWMM examina cómo fluye esta agua a través de una red de tuberías, canales, instalaciones de almacenamiento y tratamiento, bombas y componentes de control. Durante una simulación compuesta por varios periodos de tiempo, el SWMM también es capaz de controlar la evolución de la cantidad y la calidad del agua de escorrentía en cada cuenca, así como el caudal, el nivel del agua en los pozos o la calidad del agua en cada tubería y canal (Houdeshel et al., 2015, p.49).



**Ilustración 28-2:** Modelación hidrológica PC-SWMM

**Fuente:** (Carson et al., 2017, p.67).

A través de su módulo de escorrentía o hidrológico, el Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (EPA SWMM), un software para la modelización hidrológica de cuencas hidrográficas, simula la infiltración, la precipitación, la escorrentía, la evaporación y el flujo subsuperficial, entre otros fenómenos. A su vez, el módulo de transporte del programa determina la contribución del flujo de escorrentía de las subcuencas modeladas, que entra en las redes de tuberías donde se determinan los caudales y las alturas piezométricas de estos sistemas.

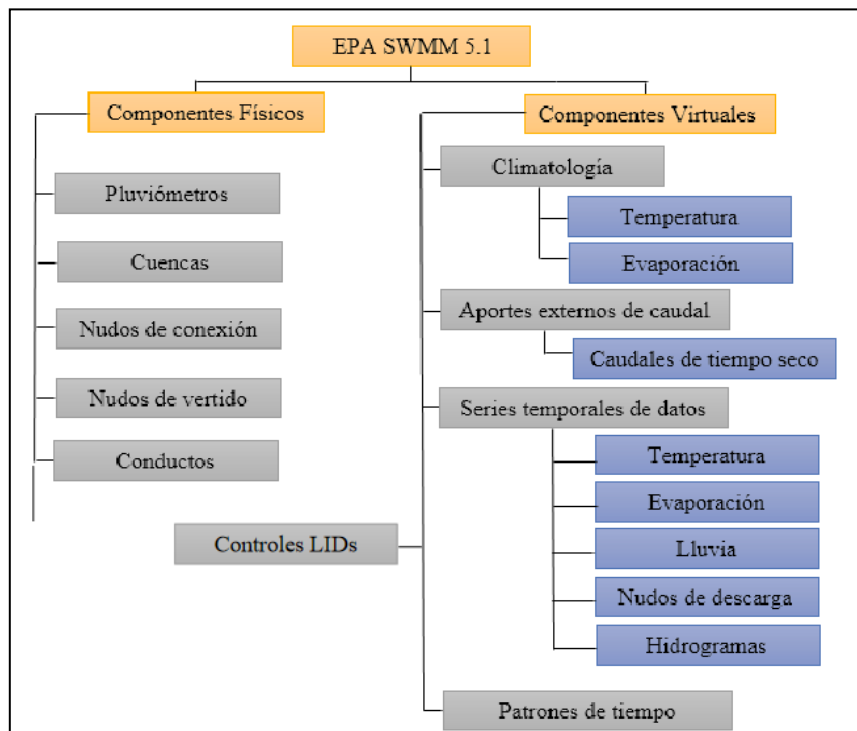
Según intervalos de tiempo predeterminados, el SWMM 5.2.1 de la EPA ofrece un seguimiento temporal de la cantidad de agua calculada y de los parámetros de calidad del agua (Yamanee-Nolin y Larson, 2019, p.44). El SWMM de la EPA es un programa basado en Windows que ofrece un

entorno integrado para la introducción de datos de entrada del área de drenaje, la simulación del comportamiento hidráulico, la estimación de la calidad del agua y la visualización de los resultados en varios formatos (Fan et al., 2019, p.211). Estos pueden incluir mapas de contorno del área de drenaje o isolíneas, gráficos y tablas de evolución temporal, diagramas de perfiles y estudios estadísticos de frecuencia. El SWMM modela los siguientes procesos hidrológicos:

- Precipitación variable en el tiempo.
- La evaporación de las aguas superficiales.
- Deshielo y acumulación de la nieve.
- La interceptación de la precipitación causada por el almacenamiento en depresión.
- La filtración de las precipitaciones en las capas del suelo que aún no están saturadas.
- Ingreso del agua en los acuíferos por infiltración (Ponnada et al., 2020, p.88).

• **Componentes del modelo EPA SWMM**

Los siguientes son los componentes necesarios para ejecutar la modelización hidrológica en SWMM 5.2.1:



**Ilustración 29-2:** Componentes virtuales y físicos de SWMM 5.2.1.

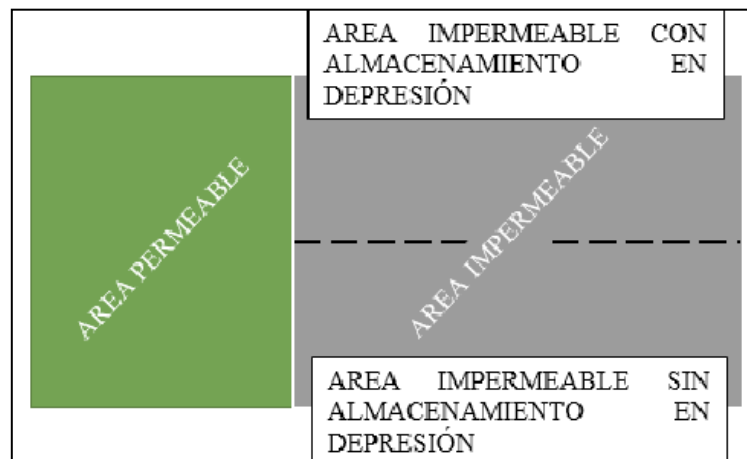
Fuente: (Bevilacqua y Arcuri, 2020, p.31).

▪ **Componentes físicos**

A continuación, se enumeran los elementos físicos que constituyen un sistema de drenaje de aguas pluviales para la modelación en el software SWMM y que suelen emplearse en los sistemas de

drenaje urbano:

- **Pluviómetros:** Los datos de entrada de las precipitaciones son proporcionados por estos.
- **Subcuencas:** son unidades hidrológicas terrestres en donde a través de la topografía y componentes del sistema de drenaje dirigen la escorrentía hacia un punto de descarga. Dentro de una cuenca pueden encontrarse subáreas permeables e impermeables (Fan et al., 2019, p.211). Las subáreas permeables permiten que la escorrentía superficial penetre en la capa superior del suelo, mientras que las subáreas impermeables no lo hacen. Dos subáreas de áreas impermeables pueden ser subdivididas: una tiene almacenamiento depresivo, la otra no.



**Ilustración 30-2:** Subáreas de una microcuenca en SWMM.

Fuente: (Muthanna et al., 2018, p.77).

- **Nodos de conexión:** Son todos los puntos del sistema de drenaje en los que se unen varias líneas entre sí. Representan físicamente los pozos de registro del sistema de drenaje o los componentes de conexión de las tuberías. Las conexiones permiten la entrada de flujos externos en el sistema.
- **Conductos:** son canales o tuberías utilizados para transportar el agua de un nodo del sistema de transporte a otro.

- **Objetos virtuales**

Los objetos virtuales son necesarios para los procedimientos de modelación, aunque no se muestren gráficamente en el software (Houdeshel et al., 2015, p.49). A continuación, se presentan algunos ejemplos de los objetos virtuales que suelen utilizarse para investigar las redes de drenaje urbano.

- **Climatología:** se introducen datos de temperatura y evaporación y se utilizan para series temporales largas de evaporación en unidades de almacenamiento (Roblero et al., 2019, p.134).
- **Entradas de flujos externos:** flujos sanitarios que se reflejan en los flujos de tiempo seco.

- **Series temporales de datos:** Se detallan las características específicas que varían en el tiempo de determinados elementos del proyecto, como la temperatura, la evaporación y las precipitaciones, entre otros (Roblero et al., 2019, p.134).
- **Patrones temporales:** permiten variaciones periódicas en el flujo externo durante los períodos de tiempo seco.
- **Controles LID:** diseñados para captar la escorrentía superficial, proporcionan una mezcla de infiltración, detención y evapotranspiración. Se consideran pertenecientes a una determinada subcuenca. Los LID se modelan en el SWMM partiendo de la hipótesis de que forman parte de la subcuenca, que trata la parte de la escorrentía producida en la sección no LID de la subcuenca. Una mezcla de capas verticales con atributos determinados por el área de la unidad, sirven como representación de los controles LID. La siguiente tabla enumera las capas que deben utilizarse con cada tipo de LID, dependiendo de si son obligatorias u opcionales (Muthanna et al., 2018, p.77).

**Tabla 5-2:** Capas en base a los diferentes tipos de LID.

LID Type	Surface	Pavement	Soil	Storage	Drain	Drainage Mat
Bio-Retention Cell	X		X	O	O	
Rain Garden	X					
Green Roof	X		X			X
Permeable Pavement	X	X	O	X	O	
Infiltration Trench	X			X	O	
Rain Barrel				X	X	
Roof Disconnection	X				X	
Vegetative Swale	X					

Fuente: (Roblero et al., 2019, p.134).

- **Métodos empleados por EPA SWMM 5.2.1.**

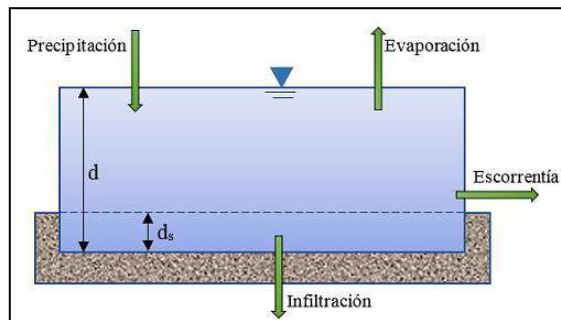
Clasificándolos a través de los módulos que conforman un estudio ambiental, se manejan los procesos hidrológico-hidráulicos para la modelación del SWMM. Hay muchos módulos de cálculo comunes:

- **Módulo Atmosférico:** El pluviómetro es el objeto utilizado para esquematizar el que procesa la entrada de lluvia en el modelo (Gimenez y Breuste, 2020, p.70).
- **Módulo de Superficie del suelo:** Este módulo toma la precipitación producida por el módulo atmosférico como entrada y la convierte en componentes de salida como la escorrentía y la infiltración; la cuenca hidrográfica es el objeto de esquematización de este modelo.
- **Módulo de Transporte:** procesa la escorrentía de las subcuencas que entran en una red de conductos, calcula el flujo a través de ellos y produce valores de caudales y presiones (Fan

et al., 2019, p.211). A continuación, se describen las técnicas que SWMM utiliza:

#### ▪ **Proceso lluvia – escorrentía**

Cada cuenca se considera un embalse no lineal, con agua de entrada procedente tanto de las precipitaciones como de una cuenca aguas arriba. La cantidad de almacenamiento en depresión que se mantiene en la superficie de cada cuenca determina la cantidad de agua que puede almacenarse en el embalse (Pérez et al., 2020, p.167). Cuando la profundidad del embalse alcanza la cantidad máxima de almacenamiento en depresión, se produce la escorrentía superficial por unidad de superficie.



**Ilustración 31-2:** Fenómeno de escorrentía

Fuente: (Shafique y Luo, 2020, p.25).

El modelo SWMM permite derivar los flujos de una región de una subcuenca a las demás y entre subcuencas. Al redirigir los flujos de las subcuencas a estas medidas y vincularlas a la red de drenaje, se permite el uso de las medidas LID.

#### **Calibración**

Es el acto de ajustar un modelo hasta que pueda simular con precisión las circunstancias presentes en el sistema en un horizonte temporal predeterminado. También puede describirse como el proceso de comparar los resultados de un modelo con los datos recogidos sobre el terreno, lo que a menudo requiere ajustar los datos de descripción del sistema hasta que el comportamiento proyectado sea suficientemente coherente con el comportamiento realmente observado en diversas situaciones de funcionamiento (Cárdenas y Jaramillo, 2017, p.69).

#### **Fuentes de error en los modelos.**

Dado que durante la creación del modelo se utilizan diversos parámetros teóricos, suposiciones y simplificaciones, es poco probable que el modelo y los hidrogramas de campo coincidan con precisión. Los principales errores que puede producir el modelo hidrológico-hidráulico son los siguientes, y son los parámetros de calibración:

- Inexactitudes en la clasificación de los rasgos físicos.
- Errores en las propiedades morfológicas de la microcuenca.



### 2.2.10.2. Modelación hidrodinámica con SWMM

Dado que hay que calcular los volúmenes de escorrentía, introducir la escorrentía en la red de alcantarillado, confirmar la capacidad hidráulica de la red y garantizar el transporte y la descarga a una fuente receptora, el desarrollo de un drenaje urbano adecuado requiere el conocimiento y la aplicación de modelos tanto hidrológicos como hidráulicos, es decir, un modelo hidrodinámico. A continuación, a partir de la escorrentía superficial, deben calcularse variables hidráulicas como el nivel del agua y la velocidad del fluido en las tuberías de alcantarillado (Shafique y Luo, 2020, p.25).

#### **Características del modelo hidrológico**

El SWMM tiene en cuenta los distintos procesos hidrológicos que tienen lugar en la salida de las aguas urbanas entre los cuales se encuentran:

- Precipitaciones que varían en el tiempo.
- Proceso de evaporación de las aguas superficiales.
- Proceso de filtración de la lluvia en las capas del suelo que aún no están saturadas.
- El intercambio entre el sistema de transporte y los acuíferos.
- Modelo de depósito no lineal de flujo superficial (Skala et al., 2020, p.81).

#### **• Características del modelo de calidad**

La acumulación, el arrastre, el transporte y el tratamiento de cualquier elemento de la calidad del agua pueden examinarse con el SWMM. Las acciones necesarias para llevar a cabo un análisis de este tipo son:

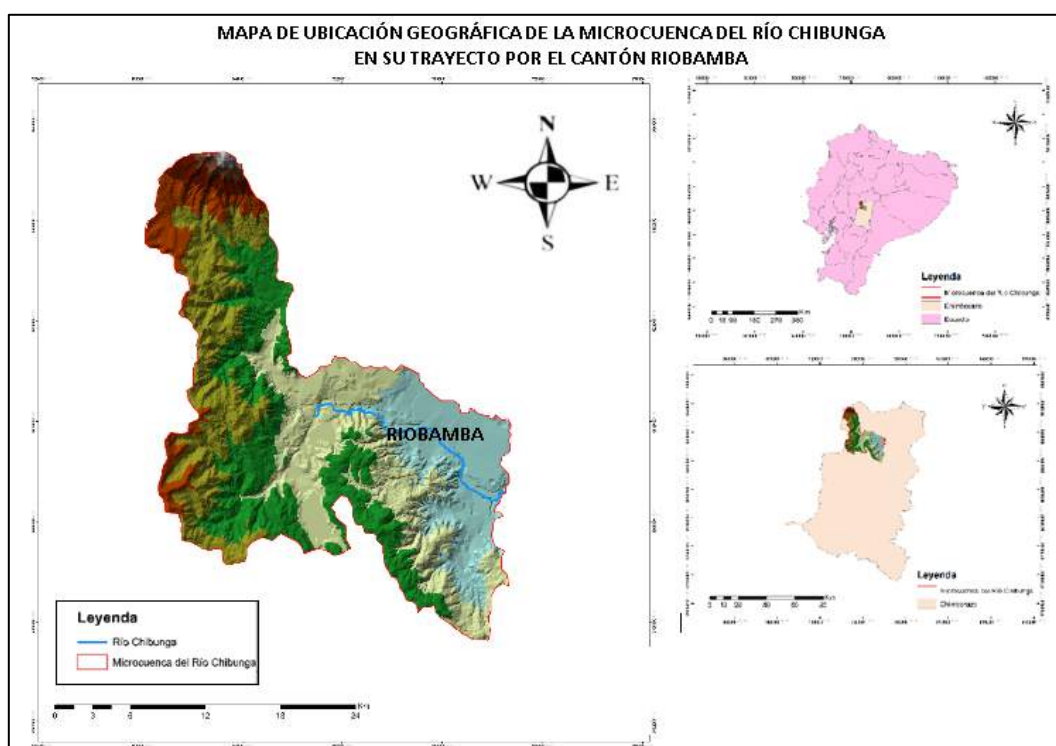
- Definir los contaminantes que se van a examinar.
- Identificar los diferentes tipos de uso del suelo que producen estos contaminantes.
- Definir los parámetros de la función de arrastre y acumulación
- Definir los procedimientos de eliminación de contaminantes en los nodos del sistema de drenaje con capacidad para tratarlos (Skala et al., 2020, p.81).

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ubicación del área de estudio

La microcuenca del río Chibunga está situada en la provincia de Chimborazo, en el cantón de Riobamba, por lo que se la denomina el "corazón" del país. Su límite norte está formado por la microcuenca del río Guano; su límite sur por la microcuenca del río Guamote y la quebrada Compuene; su límite este está dado por la subcuenca del río Chambo y su límite oeste está formado por la cuenca del río Guayas. Está a 4995 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media anual de 14 °C, y 561 milímetros de precipitación (Ariza et al., 2019, p.110).



**Ilustración 32-3:** Mapa geográfico de la microcuenca del Río Chibunga.

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

### 3.2. Esquema del marco metodológico



**Ilustración 33-3:** Esquema del marco metodológico empleado en el proyecto de investigación.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

### 3.3 Características de la zona de estudio

La longitud de la microcuenca del río Chibunga, que comienza en la confluencia de los ríos Chimborazo y Cajabamba y termina en la desembocadura del río Chambo, es de 38,62 km. Se incluyen los cantones Riobamba y Colta. Al ser la microcuenca un cuerpo receptor de desechos, diferentes actividades humanas han provocado el deterioro de las características ecológicas, dando lugar a una serie de problemas sociales y ambientales. A lo largo del río existen sectores importantes como: agrícola, ganadero, urbano, industrial, educativo y centros de recreación (Pérez et al., 2020, p.167). Los datos a continuación, permitieron conocer las condiciones físicas de la zona, en efecto como referencia de la situación anterior a la realización del estudio, en el cual se consideraron los siguientes factores:

- **Geología:** Sobre la base de investigaciones anteriores, una revisión de la literatura sobre el tema y el control de campo, se examinó la geología de la microcuenca. Cuando se trata de detalles particulares sobre las características estructurales, se pueden descubrir mediante la observación directa de la pendiente o de los pozos.
- **Geomorfología:** Para determinar las distintas características geomorfológicas, la información se recopiló mediante la fotointerpretación y/o la interpretación de imágenes de satélite con el correspondiente control de campo (Muthanna et al., 2018, p.77).
- **Suelos:** Para elaborar el mapa de suelos con su correspondiente leyenda de niveles tras determinar las propiedades físicas y químicas de los distintos horizontes que componen el perfil del suelo. Los datos de los mapas se recopilaron de diversas fuentes, como; SIG, TIERRAS (MAGAP), IGM.
- **Hidrología:** La información se proporcionó mediante datos recopilados, examinados y procesados sobre el caudal. A partir de los caudales distintivos de los principales afluentes, se identificó el régimen hidrológico predominante en la microcuenca. También se identificaron las secciones transversales del cauce natural para la región de efecto directo, donde el eje X representa el ancho del río y el eje Y su profundidad (Muthanna et al., 2018, p.77).
- **Hidrografía:** Los principales afluentes de la microcuenca, que incluyen arroyos, ríos y quebradas fueron analizados y ordenados por secciones para el estudio de la red hidrográfica. Los perfiles y la agrupación de secciones que acompañan al mapa hidrográfico representan el modelo hidrográfico conceptual del sitio (Skala et al., 2020, p.81).
- **Clima:** Se estimó el comportamiento mensual durante el primer semestre del año en curso de las siguientes variables asociadas al área de influencia indirecta a partir de los datos de las variables climáticas recogidas, analizadas y procesadas de la estación meteorológica de la ESPOCH, INAMHI. Estas variables incluyeron: temperatura (media, mínima y máxima), precipitación (media y mensual), y evaporación (media y mensual).

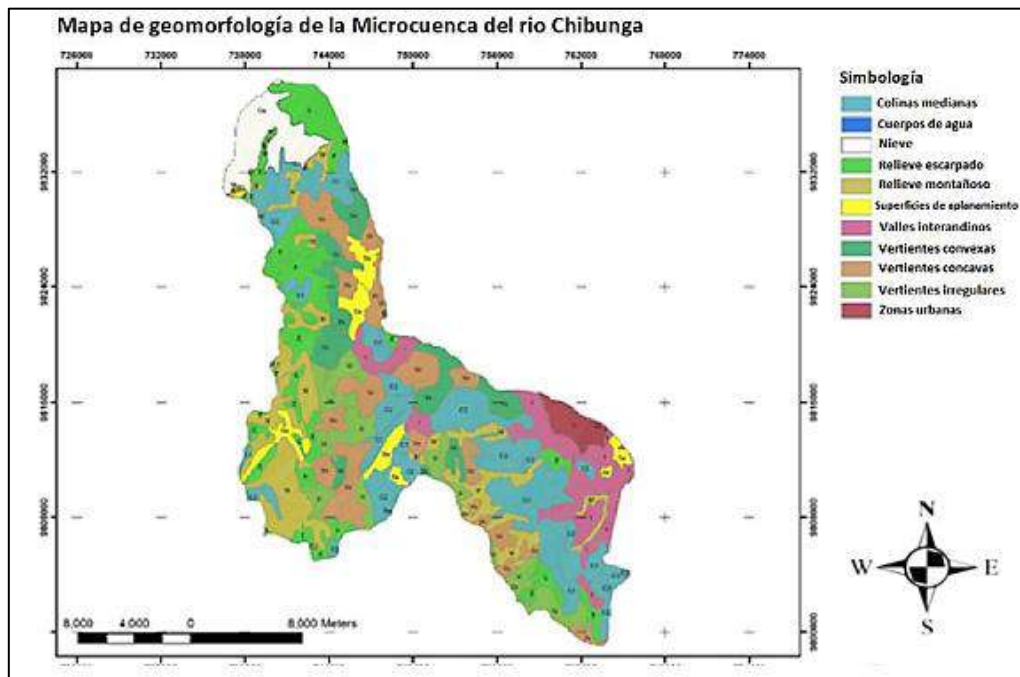
### ***3.3.1. Determinación de parámetros geomorfológicos***

Para calcular la geomorfología de la microcuenca se utilizaron herramientas geoespaciales, como el análisis espacial, el análisis espacial en 3D, la hidrología, las pendientes y el drenaje en una base de datos SIG.

#### ***3.2.1.1. Geomorfología***

Terrenos nevados, escarpados y montañosos, colinas medianas, cuerpos de agua, superficies planas, valles interandinos, laderas convexas, cóncavas e irregulares y áreas urbanas conforman

la geomorfología de la microcuenca del río Chibunga (Shafique y Luo, 2020, p.25). La altiplanicie de Tapi, de 2500-3000 msnm, en la que predominan las pequeñas colinas con cimas redondeadas y secciones planas. Su morfología está relacionada con las múltiples etapas de relleno con materiales detríticos, que luego fueron cubiertos por potentes depósitos volcánicos del Chimborazo, del tipo nube ardiente y lava.

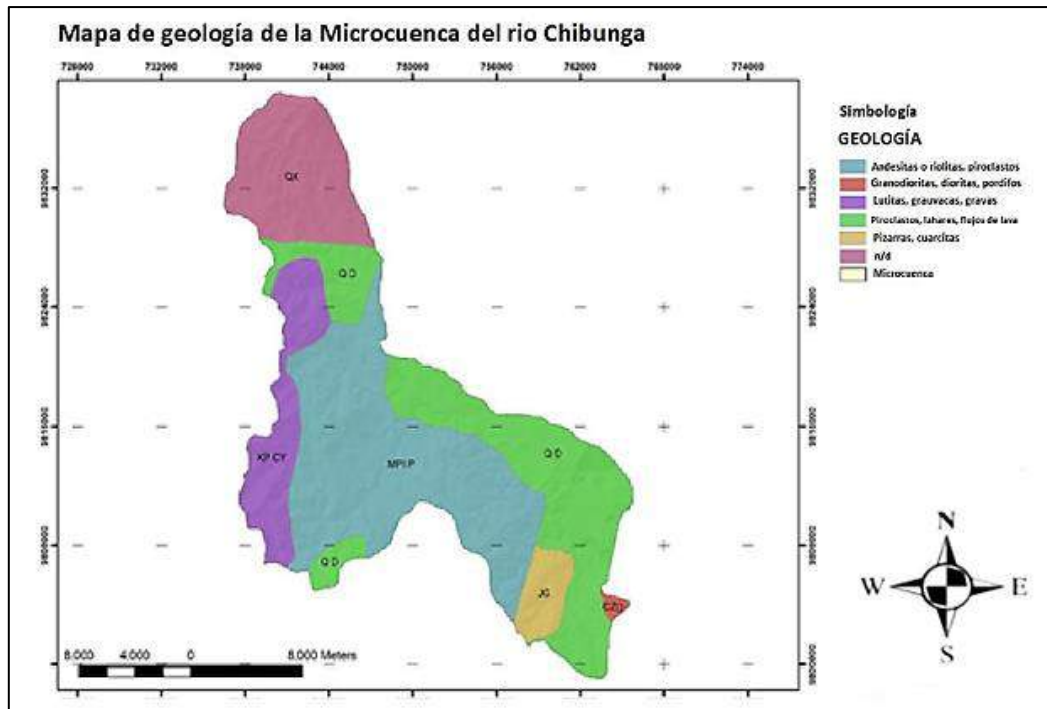


**Ilustración 34-3:** Mapa Geomorfológico de la Microcuenca del río Chibunga.

**Fuente:** (Pérez et al., 2020, p.167).

### 3.2.1.2. Geología

La geología de la microcuenca del río Chibunga sigue la clasificación litológica de flujos de lava, lahares y piroclastos formados principalmente por depósitos volcánicos de tipo histórico que se encuentran registrados por el volcán Chimborazo, cubiertos por cenizas, estratos y pómez de espesor variable, pizarras, pórfidos, cuarcitas y por depósitos aluviales que son depósitos de arena y grava que se encuentran en fuentes fluviales antiguas y modernas a lo largo del río Chibunga. Aunque su espesor es difícil de determinar, se cree que pueden tener hasta 60 m (Houdeshel et al., 2015, p.49)



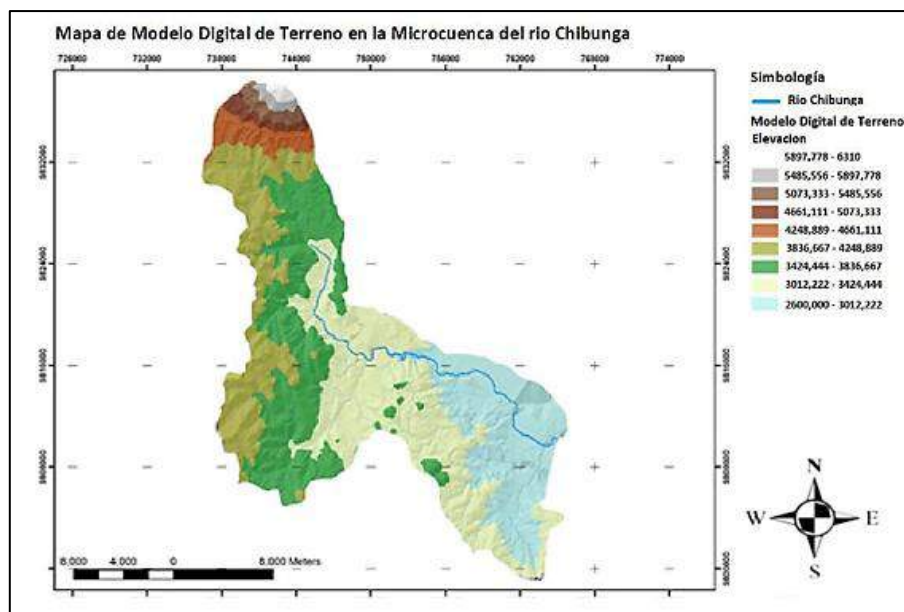
**Ilustración 35-3:** Mapa geológico de la microcuenca del río Chibunga.

Fuente: (Pérez et al., 2020, p.167).

### 3.2.1.3. Climatología

Desde la formación del primer riachuelo a 6310 metros sobre el nivel del mar, donde se encuentra el volcán Chimborazo, hasta la desembocadura del río Chibunga al río Chambo a 2600 metros sobre el nivel del mar, la microcuenca del río Chibunga se extiende consecutivamente al recorrer esta trayectoria (Skala et al., 2020, p.81).

Este descenso en la elevación hace que el clima cambie según el terreno; es frío y glacial por encima de los 4600 msnm; entre los 3000 msnm y los 2000 msnm, predomina el clima de páramo; y a los 2000 msnm, el clima cambia de mesotérmico cálido a semicálido con una temperatura media de 13°C.

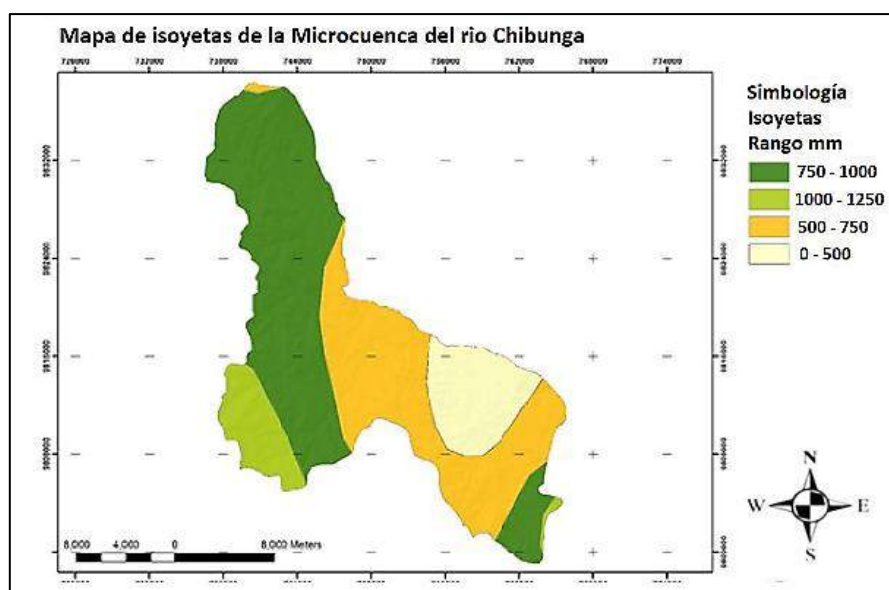


**Ilustración 36-3:** Mapa del modelo digital de terreno del río Chibunga

Fuente: (Roblero et al., 2019, p.134).

### 3.2.1.4. Precipitaciones

A 2.780 metros sobre el nivel del mar, el clima en el valle de Riobamba experimenta dos estaciones distintas: la húmeda y la seca. Según los registros descritos de la estación meteorológica que se encuentra ubicada en la ESPOCH, en la zona baja de la microcuenca existen dos estaciones lluviosas distintas, la primera de las cuales dura de febrero a mayo y la segunda de octubre a diciembre (Fan et al., 2019, p.211).



**Ilustración 37-3:** Mapa de Isoyetas de la Microcuenca del río Chibunga.

Fuente: (Roblero et al., 2019, p.134).

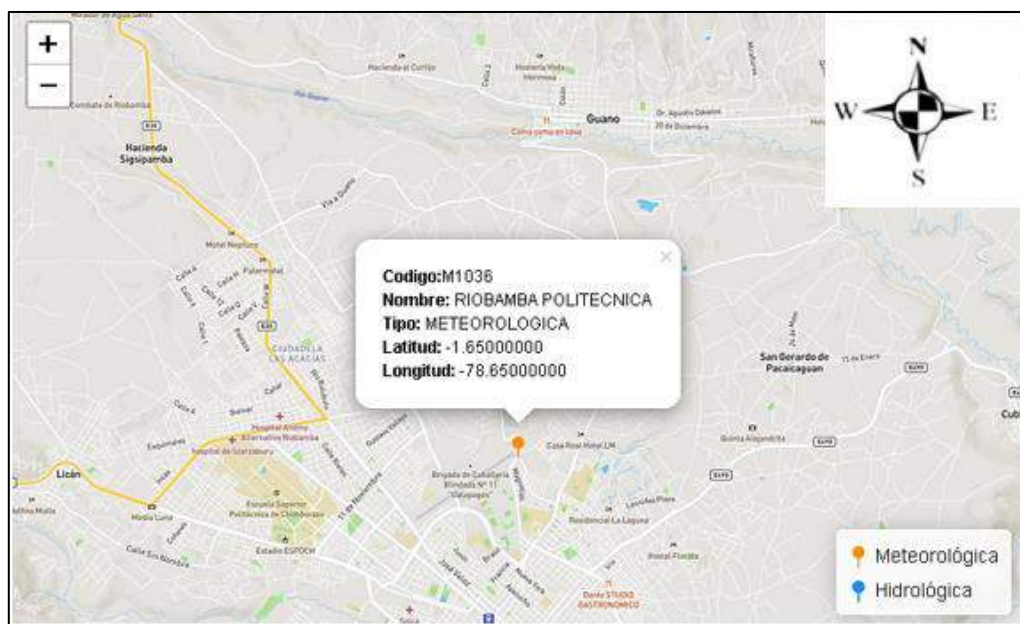
### Precipitaciones de la microcuenca

Se utilizó la estación meteorológica más cercana que fue perteneciente a la ESPOCH, ya que no existen estaciones pluviométricas dentro de la microcuenca en investigación.

**Tabla 6-3:** Ubicación de la Estación Meteorológica

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	COORDENADAS	
			X	Y
M1036	Meteorológica	ESPOCH	758399,4	9816244,9

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.



**Ilustración 38-3:** Ubicación de la Estación Meteorológica

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

### Determinación del balance hídrico

La estación meteorológica M1036 de la ESPOCH, que se consideró la más cercana a la microcuenca, proporcionó los datos necesarios para calcular el balance hídrico de la microcuenca. El plazo del estudio fue de 6 meses. Para la determinación de las variables hidrológicas de la microcuenca se calcularon valores medios y mensuales, tanto de temperatura del aire, así como de evaporación y precipitación.

#### 3.2.1.5. Uso del suelo

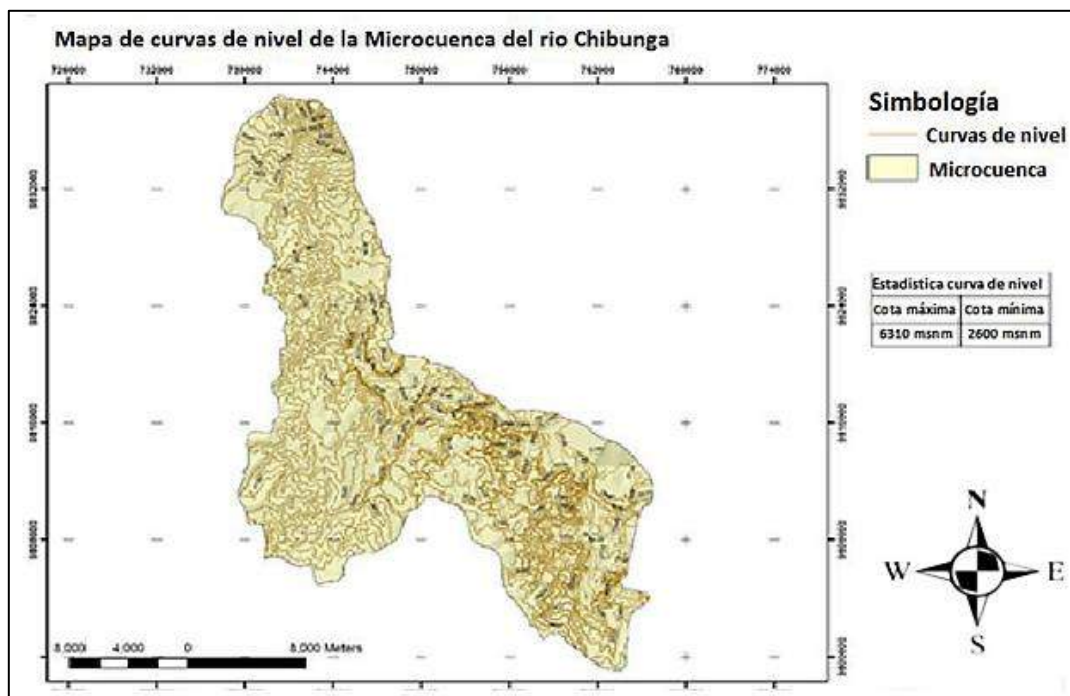
Se creó la categorización del uso de la tierra del área de investigación y los mapas temáticos de 2001 y 2016. Se utilizó la leyenda de Nivel 2 de coberturas y usos del suelo creada por el Ministerio de Medio Ambiente en colaboración con el Ministerio de Agricultura, Ganadería,



Acuicultura y Pesca para generar la leyenda de coberturas de usos del suelo actuales en la microcuenca. Tras el procesamiento de las imágenes Landsat 7 y 8, se utilizó el procedimiento de clasificación supervisada para determinar las diferentes categorías de uso del suelo que existían en la microcuenca del río Chibunga entre 2001 y 2016. Para esta zona de investigación se definieron ocho clases de uso del suelo: cuerpos de agua, pastos, nieve, suelos sin cobertura, páramo, zona agrícola, área habitada y bosque. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando el software Arcgis 10.5.

### 3.2.1.6. Hidrología

En el lado sur del nevado Chimborazo (6310 msnm), el río Chibunga, también conocido como Q. Yurimachay, emerge del deshielo de las estribaciones. Recorre un camino serpenteante entre las cenizas volcánicas y los cantos rodados que arrojó el volcán hace millones de años. El cauce discurre en dirección norte-sur en el tramo superior antes de cambiar a un curso noreste-sureste en San Juan y continuar hasta pasar por Riobamba. Las curvas de nivel de la cuenca del río Chibunga van desde una altitud de 6310 metros sobre el nivel del mar hasta una altura de 2600 metros sobre el nivel del mar (Muthanna et al., 2018, p.77).

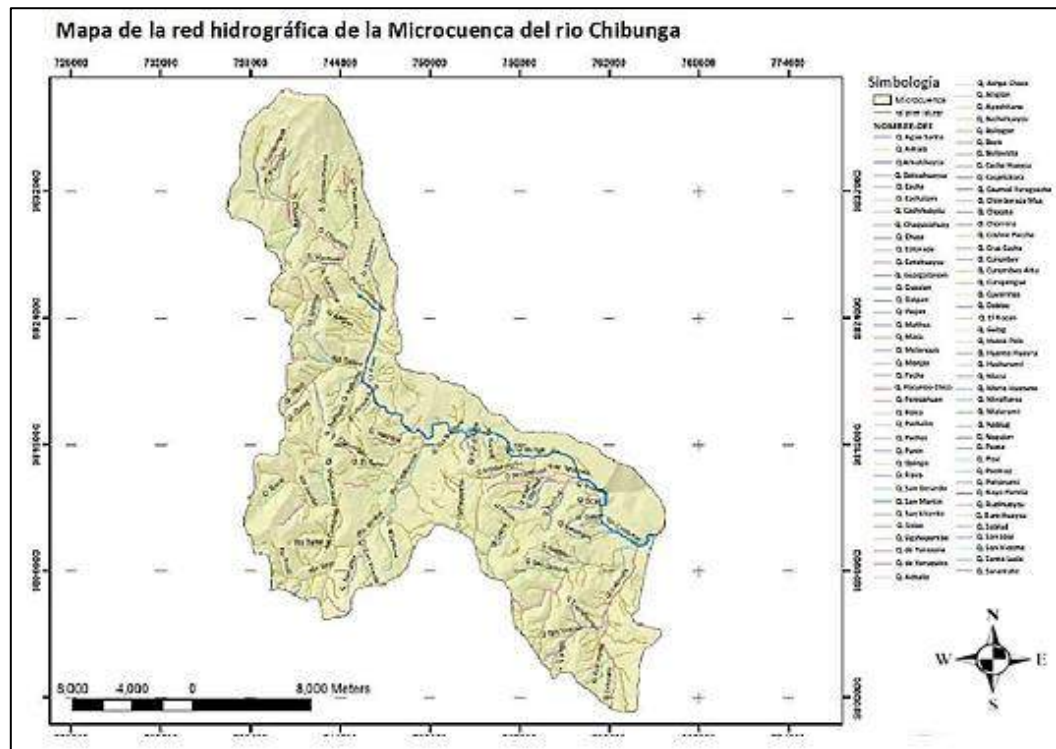


**Ilustración 39-3:** Mapa que representa las curvas de nivel de la microcuenca del río Chibunga

**Fuente:** (Fan et al., 2019, p.211).

### 3.2.1.7. Hidrografía

La red hidrográfica de la microcuenca del río Chibunga está conformada por diversos tipos de cursos de agua: quebradas, drenajes menores, ríos, primarios y secundarios. Tres ríos mayores la integran que son: Chimborazo, Cajabamba y el Chibunga, así como otros menores como el Pasoaso, Rayo, Batán y Sicalpa (Kwak y Han, 2016, p.30).



**Ilustración 40-3:** Mapa que representa la red hidrográfica de la Microcuenca del río Chibunga

Fuente: (Fan et al., 2019, p.211).

## 3.4. Modelación hidrológica de la microcuenca del río Chibunga

### 3.4.1. Características hidrológicas del modelo

#### 3.4.1.1. Parámetros de infiltración

En el modelo hidrológico se empleó la técnica de infiltración del Número de Curva, cuyos valores dependieron del grupo hidrológico, del uso del suelo y de su cobertura. Se elaboró utilizando las siguientes propiedades:

## Infiltración

Características como la topografía, los suelos y los patrones de precipitación del área de estudio llevaron a la selección de un valor de 0,05, que representa un alto grado de complejidad del sistema (Joshi et al., 2021, p.73).

**Tabla 7-3:** Aportes por infiltración

Nivel de complejidad del sistema	Infiltración alta (l/s-ha)	Infiltración media (l/s-ha)	Infiltración baja (l/s-ha)
Bajo y medio	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	0.05 - 0.2
Medio y alto	0.15 - 0.4	0.1 - 0.3	0.05 - 0.2

Fuente: (Conley et al., 2020, p.69).

### 3.4.1.2. Asignación de números de curva

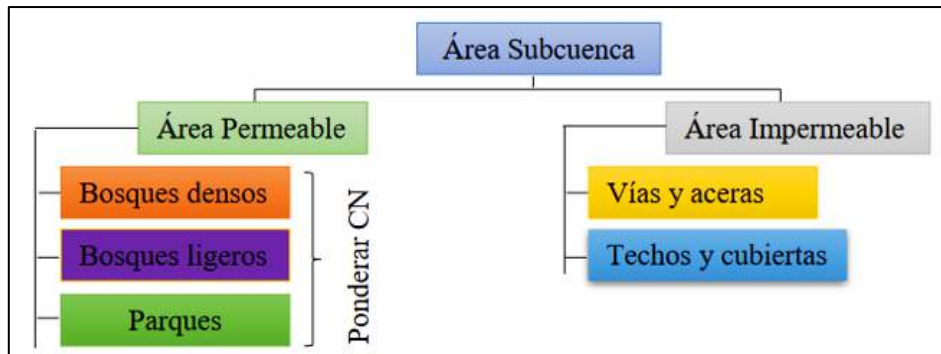
Una vez seleccionadas las coberturas de suelo existentes en base a la tabla siguiente y teniendo en cuenta el mapa de grupos de suelos hidrológicos ya creado en la zona de estudio, se determinaron los valores de los coeficientes CN.

**Tabla 8-3:** CN seleccionado en base al tipo de cubierta y grupo de suelo.

Descripción del uso de la tierra		Grupo Hidrológico de suelo				
		A	B	C	D	
<b>Impermeables</b>	Aceras y veredas			98		
	Cubiertas y techos de edificios y casas			98		
<b>Permeables</b>	Bosques densos, cubierta buena	25	55	70	77	
	Bosques ligeros, cubierta pobre, troncos delgados	45	66	77	83	
	Parques, áreas abiertas, césped, cubierta de pasto > 75%	39	61	74	80	

Fuente: (Kwak y Han, 2016, p.30).

Para la ponderación del valor CN, sólo se ha utilizado la parte permeable de la microcuenca porque, teóricamente, no hay infiltración en la parte impermeable de la microcuenca porque toda la precipitación se convierte en escorrentía (Hou et al., 2022, p.83).



**Ilustración 41-3:** Ponderación de CN en zonas permeables

Fuente: (Joshi et al., 2021, p.73).

### 3.4.1.3. Rugosidad superficial

A las distintas regiones del mapa de uso y cobertura se les asignó una rugosidad superficial mediante la siguiente tabla:

**Tabla 9-3:** Coeficientes de rugosidad de superficie.

Superficie	n
Asfalto suave	0.011
Concreto suave	0.012
Revestimiento ordinario de concreto	0.013
Madera buena	0.014
Ladrillo con mortero de cemento	0.014
Arcilla vitrificada	0.015
hierro fundido	0.015
tuberías corrugadas de metal	0.024
superficies de escombros de cemento	0.024
terrenos sin cultivo (sin residuos)	0.05
Suelos cultivados	
cobertura residual < 20%	0.06
cobertura residual > 20%	0.17
Extensiones naturales	0.13
Corto pradera	0.15
Denso	0.24
Césped Bermuda	0.41
Bosques	
Ligeros	0.40
Densos	0.80

Fuente: (Legates, 2007, p.88).

**Tabla 10-3:** Coeficiente n seleccionado en base a la cobertura de suelo

Zonas		n
Impermeables	Aceras y veredas	0.011
	Techos	0.012
Permeables	Bosques densos cubierta buena	0.8
	Bosques ligeros troncos delgados, cubierta pobre	0.4
	Parques, áreas abiertas, césped, cubierta de pasto > 75% (óptimas condiciones)	0.15

Fuente: (Hou et al., 2022, p.83).

El software SWMM 5.2.1 requiere la introducción de dos coeficientes de rugosidad, uno para la zona permeable y otro para la zona impermeable dentro de la microcuenca.

Dado que hay varios tipos de cobertura y usos del suelo en esta zona, los coeficientes de rugosidad para las áreas permeables e impermeables se ponderaron utilizando la ecuación siguiente:

$$n_{ponderada} = \frac{\sum A_n \cdot n_n}{A_t} \quad (\text{Ec.7-3})$$

**Dónde:**

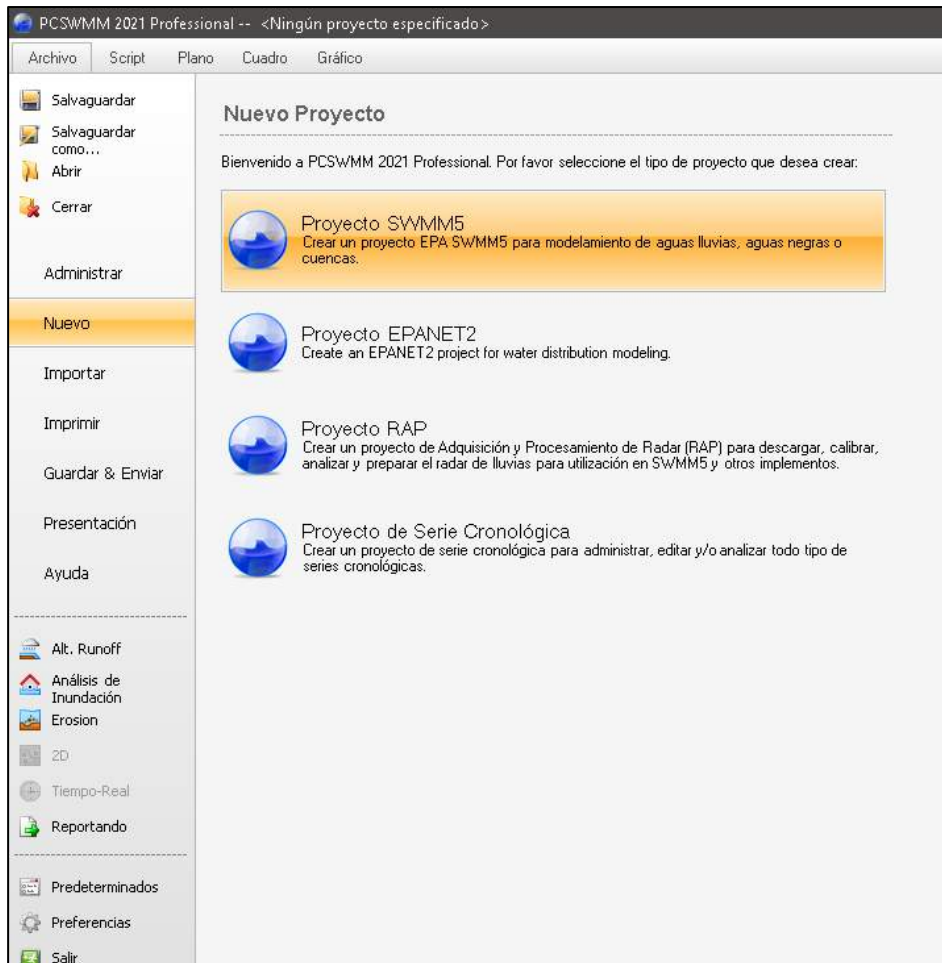
**An** = Área que es parcialmente permeable o impermeable dependiendo del uso del suelo.

**nn** = Coeficiente de rugosidad de la superficie en función de la cobertura y uso del suelo.

**At** = Área permeable o impermeable total.

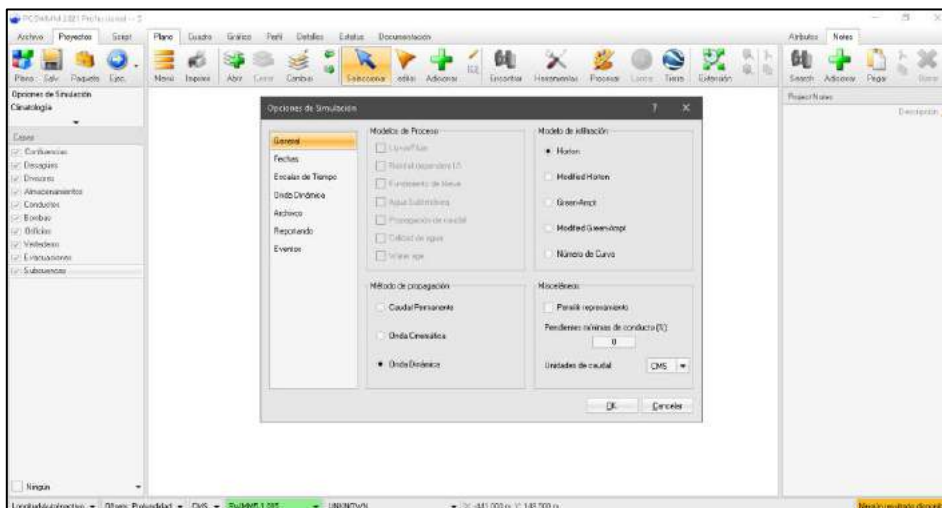
### 3.4.2. Creación del modelo en SWMM

Una vez establecidos los parámetros hidrológicos y las características de la microcuenca, intersecciones y conducciones, se utilizó SWMM 5.2.1 para ejecutar y modelar los datos de acuerdo con los pasos que se indican a continuación:



**Ilustración 42-3:** Interfaz del Software SWMM.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.



**Ilustración 43-3:** Software SWMM 5.2.1.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

### Definición de SUDS o LID controls en SWMM 5.2.1

Antes de comenzar la simulación, fue necesario predefinir los elementos de Control LID a utilizar, para lo cual se siguió el siguiente procedimiento:

1. Comenzamos seleccionando el menú Proyecto/ Hidrología/Controles LID.
2. Se estableció un nombre al LID Control para poder identificarlo.
3. Se seleccionó el tipo de elemento a definir en el modelo.
4. Se completó la información necesaria para cada tipo de Control LID.
5. Finalmente, se aceptaron los argumentos para que el elemento sea guardado correctamente.

#### 3.4.2.1. Diseño de técnicas LIDs

Para el diseño de las técnicas de drenaje sostenible en los diferentes sistemas, primero fue necesario dirigirse a la en la ventana “Project”, opción “Hidrology”, complemento “LID Controls”, como se observa a continuación:



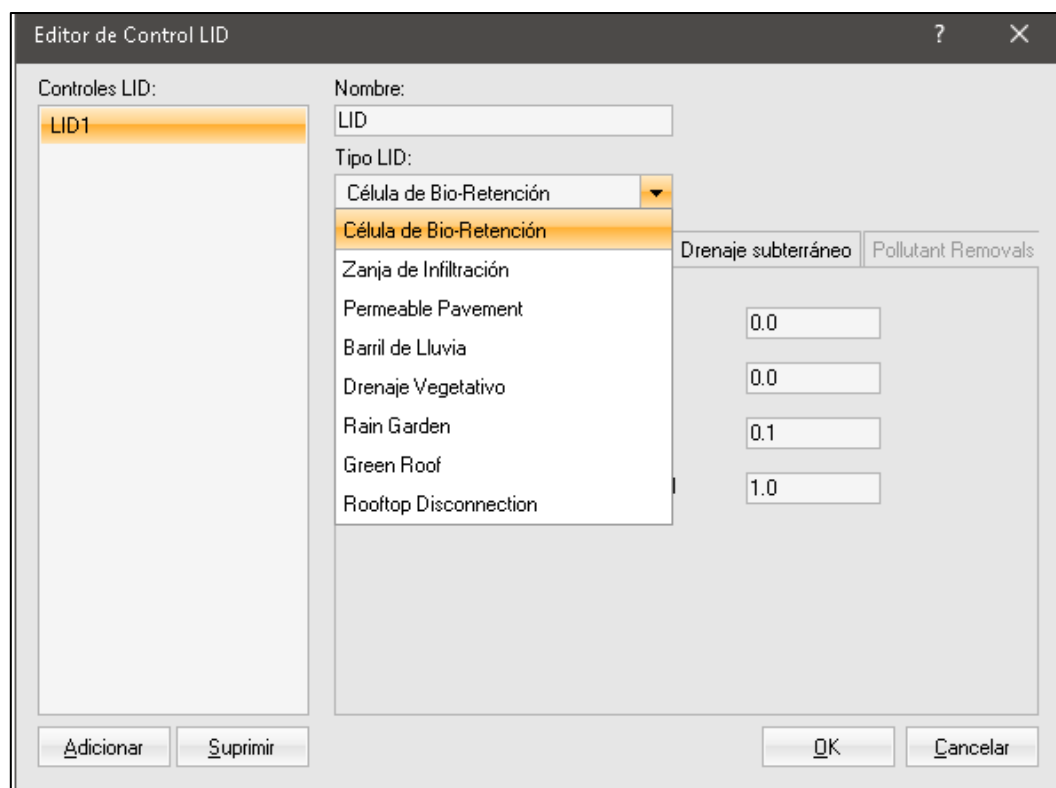
**Ilustración 44-3:** LID Controls.

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

Cuando se añadió una técnica de drenaje sostenible, se lanzó la herramienta LID Control Editor para especificar los rasgos de los distintos niveles de la metodología. Se procedió a elegir el tamaño y el número de repeticiones para cada subcuenca.

Cada LID tiene sus propias capas, como ya se ha señalado, y a su vez tienen cualidades únicas, que se describen a continuación:

- **Control Name:** es el nombre que fue otorgado al elemento para diferenciarlo entre los demás.
- **LID Type:** Esta sección incluyó muchas LID como: celdas de biorretención, jardines de lluvia, techos verdes, zanjas de infiltración, pavimento permeable, barriles de lluvia, desconexiones de techos y cunetas vegetales (Hou et al., 2022, p.83).



**Ilustración 45-3:** Ventana para agregar el Tipo de alternativa LID

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Según el tipo de medida utilizada para la modelización, se especificaron los parámetros adecuados para cada capa que compone la medida con el fin de introducir las características de los LID en el modelo.

Estos valores condicionaron luego el funcionamiento de los LID en el modelo y de cada capa. Se presentaron diferentes pestañas que corresponden a los estratos horizontales que componen el elemento dependiendo del tipo de LID o tecnología de drenaje sostenible elegida, así:



**Tabla 11-3:** Combinaciones de capas para cada LID en SWMM 5.2.1.

CAPAS	Surface	Pavement	Soil	Storage	Drain	Roof Drain	Drainage Mat
	Superficie	Pavimento	Suelo	Almacenamiento	Desague inferior	Bajante	Tapiz drenante
Bio-retention cell	X		X	X	O		
Rain garden	X		X				
Green roof	X		X				X
Infiltration trench	X			X	O		
Permeable pavement	X	X	X	X	O		
Rain barrel, Rooftop disconnection	X			X	O	O	
Vegetative Swale	X						

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

### 3.4.2.2. Alternativas de rehabilitación sostenible

Se eligieron tres técnicas de control LID (pavimento permeable, techos verdes y celdas de biorretención) de las ocho accesibles en el programa SWMM 5.2.1 para la ejecución y modelación en el presente proyecto de investigación. Cada LID incluía capas de componentes que se rellenaron con los valores necesarios para los distintos parámetros. Adicionalmente, se utilizaron las tablas que ofrece el SWMM 5.2.1 con la debida transformación de unidades para ajustarse a las unidades utilizadas en el proyecto, que están en el sistema internacional de medidas, para completar la información requerida en cada una de las capas de Control LID (Czemieli, 2010, p.91). Se introdujeron diferentes datos para cada uno de los componentes de las capas, justificando cada uno de los valores elegidos en base a las consideraciones que se enumeran a continuación para realizar la correspondiente modelación y posterior simulación con técnicas de drenaje sostenible en la microcuenca del río Chibunga.

- **Celdas de bio-retención**

- Surface: Describió las propiedades de la capa vertical inicial del LID.
- Berm Height: Incluyó el nivel más alto al que se pudo almacenar el agua por encima de la superficie sin que se haya desbordado (in o mm).
- Para la cuenca de biorretención se ha elegido una altura de 40 cm, ya que es razonable que la gente pueda ver las plantas que se plantarán allí.
- Vegetation (Volume Fraction): Fue aquel espacio ocupado por los tallos y las hojas.
- La capa superficial, como se ha señalado anteriormente, se caracterizó por una altura de 40 cm, que en relación con el volumen para un metro cuadrado sería de 0,40 m<sup>3</sup>, y si estimamos

el 20% ocupado por los tallos y las hojas obtenemos un volumen de 0,08 m<sup>3</sup>. El SWMM 5.2.1 recomienda un valor de 0,00 a 0,20. Por ejemplo, plantar por cada metro cuadrado un árbol de hasta 40 cm de ancho y 20 plantas ornamentales nos dará el volumen de ocupación indicado. El volumen de 0,08 m<sup>3</sup> elegido representa una cubierta densa de césped con una altura de 8 cm de sus hojas para el rango máximo de ocupación permitido. Sin embargo, se podrían plantar otros tipos de plantas que dándoles un espaciado para su correcto desarrollo el volumen de ocupación será mucho menor.

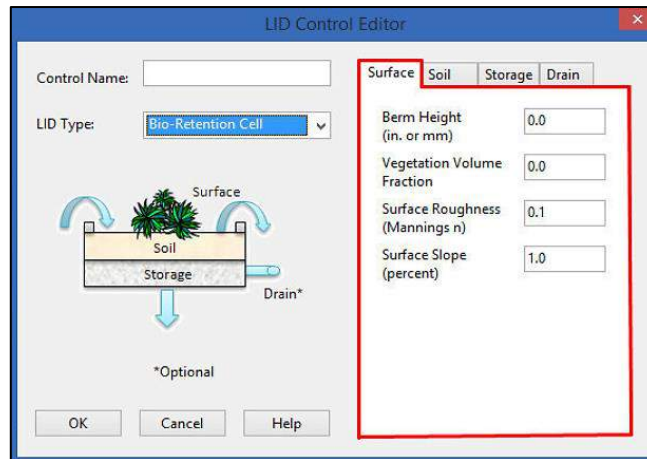
- Surface Roughness: Se utilizaron los valores de SWMM 5.2.1 para el coeficiente de Manning específico de la superficie (Czemiel, 2010, p.91).
- Se seleccionó el valor (césped denso) de 0,24 de la tabla correspondiente para la rugosidad de superficie:

**Tabla 12-3:** Valores de la rugosidad de superficie.

Superficie	n
Asfalto suave	0.011
Concreto suave	0.012
Revestimiento ordinario de concreto	0.013
Madera buena	0.014
Ladrillo con mortero de cemento	0.014
Arcilla vitrificada	0.015
hierro fundido	0.015
tuberías corrugadas de metal	0.024
superficies de escombros de cemento	0.024
terrenos sin cultivo (sin residuos)	0.05
Suelos cultivados	
cobertura residual < 20%	0.06
cobertura residual > 20%	0.17
Extensiones naturales	0.13
Corto pradera	0.15
Denso	0.24
Césped Bermuda	0.41
Bosques	
Ligeros	0.40
Densos	0.80

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

- Surface Slope: Porcentaje de la pendiente del elemento al que se transportó el agua.
- Dado que ni el SWMM 5.2.1 ni el Manual SUDS especifican un rango, se ha elegido un valor de 1% de pendiente para promover la infiltración en el suelo.



**Ilustración 46-3:** Parámetros de la capa superficial

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

- Soil: Son tanto las cualidades de la capa, los cuales soportó la vegetación como la de la capa que estuvo en contacto con la superficie.
- Los valores utilizados para las capas correspondientes se basaron en los valores típicos del suelo de la tabla siguiente, ya que era necesario colocar un suelo artificial para la modelización de las distintas técnicas de LID con el fin de maximizar el uso de las técnicas (Czemieli, 2010, p.91).

**Tabla 13-3:** Parámetros definidos para las diferentes clases de suelo.

Suelo	Porosidad	Capacidad de Campo	Punto de Marchitez	Conductividad (nm/h)	Altura de succión (mm)
Arena	0.437	0.062	0.024	120.396	49.022
Arena Francosa	0.437	0.105	0.047	39.972	60.960
Franco Arenoso	0.453	0.190	0.085	10.922	109.982
Franco	0.463	0.232	0.116	3.302	88.900
Franco Limoso	0.501	0.284	0.135	6.604	169.926
Franco arcillo arenoso	0.398	0.244	0.136	1.524	219.964
Franco Arcilloso	0.464	0.310	0.187	10.016	210.058
Franco Limoso Arcilloso	0.471	0.342	0.210	1.016	270.002
Arcilla Arenosa	0.430	0.321	0.221	0.508	240.030
Arcilla limosa	0.479	0.251	0.251	0.508	290.068
Arcilla	0.475	0.265	0.265	0.254	320.040


Fuente: (Hou et al., 2022, p.83).

- Thickness: Altura de la capa de suelo en la que fue aplicada (in o mm).
- Para favorecer el crecimiento de las raíces en la capa del suelo, se ha elegido una altura de 50 cm.

- Porosity (Volume fraction): Se refiere a la cantidad de vacíos del suelo que fueron utilizados en la capa. Se ha elegido como suelo adecuado el tipo conocido como "Loam arenoso", que contiene limo, arcilla y arena con un alto contenido de arena para ayudar a la filtración.
- Se ha asignado un valor de 0,453 como tipo de suelo adecuado.
- Field Capacity (Volume fraction): En un suelo húmedo, el agua se desplazó a las capas siguientes por la fuerza de la gravedad hasta que, finalmente, el contenido de agua se estabilizó, presentándose una propiedad conocida como valor de capacidad de campo. El tipo de suelo influyó en este atributo (Hou et al., 2022, p.83).
- Se aplicó un valor de 0,190 al mismo tipo de suelo que antes.
- Wilting Point (Volume fraction): La propiedad del suelo conocida como valor del punto de marchitamiento, el cual se dio cuando el contenido de agua fue muy bajo que las plantas no pudieron absorberla. Además, el tipo de suelo influyó en él.
- Se aplicó un valor de 0.085 al mismo tipo de suelo que antes.
- Conductivity: Es la conductividad hidráulica, y el valor indicó la facilidad o dificultad con que el agua ingresó en el suelo cuando estuvo saturado. (in/h o mm/h).
- Sandy Loam nos proporcionó una cifra de 0,43 pulg/h para este tipo de suelo, que se convirtió en 10,92 mm/h en el sistema internacional (Hou et al., 2022, p.83).
- Conductivity Slope: Pendiente de la curva que fue determinada por el logaritmo de la conductividad respecto a la concentración de la mezcla del suelo.
- El valor para el tipo de suelo Sandy Loam fue del 7,5%.
- Suction Head: Fue la medida de la succión capilar típica del suelo (in o mm).
- Sandy Loam nos proporcionó un valor de 4,33 para el tipo de suelo, que convertimos en unidades del sistema internacional para obtener 110 mm.

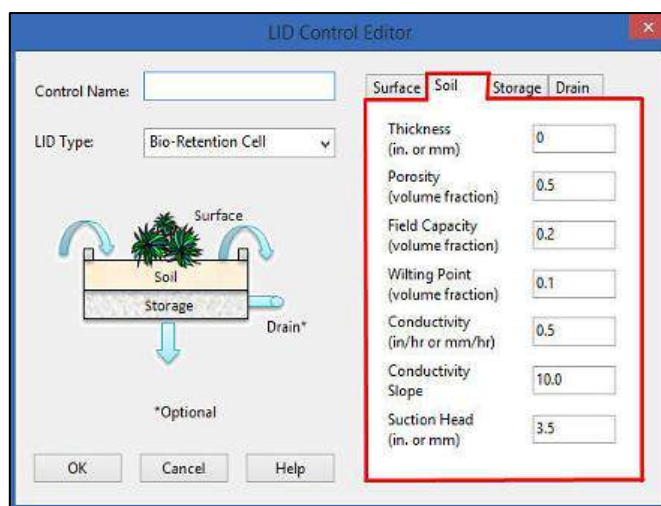
Soil Texture Class	K	$\Psi$	$\phi$	FC	WP
Sand	4.74	1.93	0.437	0.062	0.024
Loamy Sand	1.18	2.40	0.437	0.105	0.047
Sandy Loam	0.43	4.33	0.453	0.190	0.085
Loam	0.13	3.50	0.463	0.232	0.116
Silt Loam	0.26	6.69	0.501	0.284	0.135
Sandy Clay Loam	0.06	8.66	0.398	0.244	0.136
Clay Loam	0.04	8.27	0.464	0.310	0.187
Silty Clay Loam	0.04	10.63	0.471	0.342	0.210
Sandy Clay	0.02	9.45	0.430	0.321	0.221
Silty Clay	0.02	11.42	0.479	0.371	0.251
Clay	0.01	12.60	0.475	0.378	0.265

K = hydraulic conductivity, in/hr  
 $\Psi$  = suction head, in.  
 $\phi$  = porosity, fraction  
 FC = field capacity, fraction  
 WP = wilting point, fraction



**Ilustración 47-3:** Valores acorde al tipo de suelo.

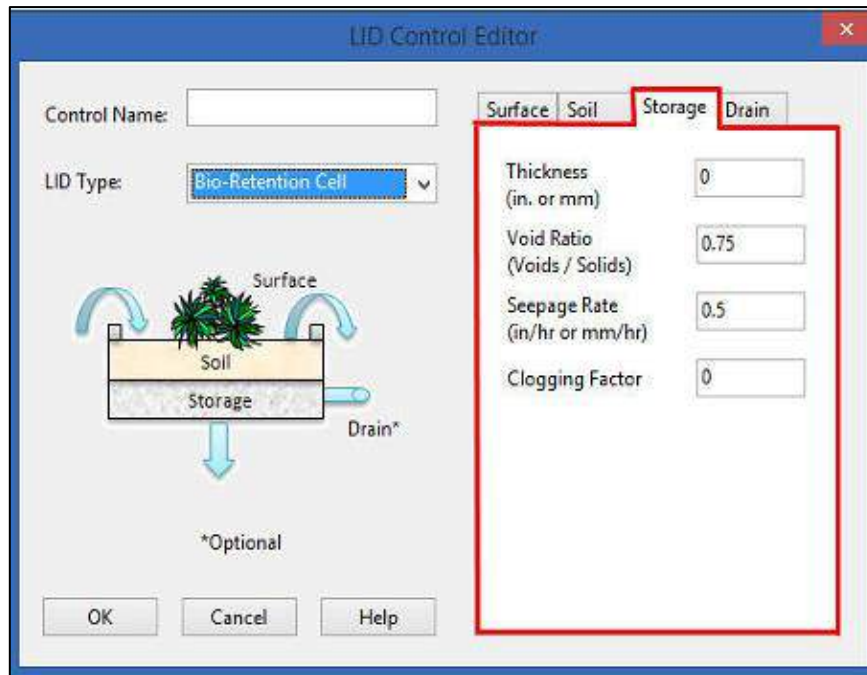
Fuente: (Joshi et al., 2021, p.73).



**Ilustración 48-3:** Parámetros definidos en la capa Soil

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

- Storage: Técnica de drenaje sostenible para almacenar agua en la que se colocó grava en zonas específicas o a la altura de un tanque de lluvia.
- Thickness: Fue la altura de la capa de suelo próxima (in o mm).
- La altura seleccionada fue de 50 cm, el cual corresponde a la altura máxima a la que se puede almacenar el agua sin que se infiltre en el suelo.
- Void ratio (Void/Soils): Describió la proporción entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos.
- La capa constituida por grava triturada nos dio un valor entre 0,30 y 0,60; a efectos del presente proyecto de estudio, se ha seleccionado un valor de 0,50, indicando que se trata de una grava limpia y libre de limo o arena, y ajustándose al rango sugerido por el SWMM 5.2.1 con valores entre 0,5 y 0,75 (Conley et al., 2020, p.69).
- Seepage Rate: Reflejó la velocidad a la que ingresó en el suelo bajo la capa de almacenamiento.
- Se introdujo la tasa de infiltración mínima de Horton del suelo natural para el caso estudiado, y se tomó en consideración un valor de 4,71 mm/h.
- Clogging Factor: Se refirió al valor que llenó completamente los espacios abiertos, impidiendo el paso del agua, y se conoce como el factor de obstrucción del almacenamiento.
- No se consideró en el caso de estudio, SWMM 5.2.1 sostiene que es necesario para la Infiltración de tipo LID.

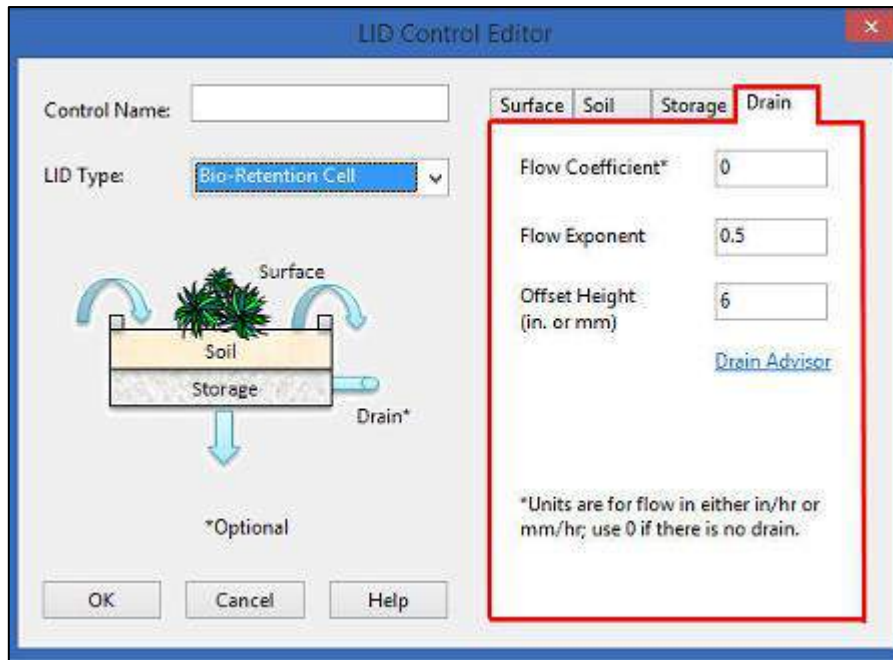


**Ilustración 49-3:** Parámetros definidos en la capa Storage

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

- Drain: Drenaje que dirigió el agua a un nuevo elemento LID o al sistema de alcantarillado. Como el agua no superó la capacidad de almacenamiento del elemento, el SWMM 5.2.1 no necesitó drenaje.
- Flow coefficient: Se asignó el número 0 para el coeficiente C, que se utilizó para calcular el caudal.
- Flow exponent: El exponente n que fue necesario para calcular el caudal.
- Drain Offset Height: El tubo de drenaje se colocó desde el fondo a la altura indicada por el valor h. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos proporcionó la siguiente fórmula, que se utilizó para calcularlo:

$$q = C h^n \quad (\text{Ec.8-3})$$

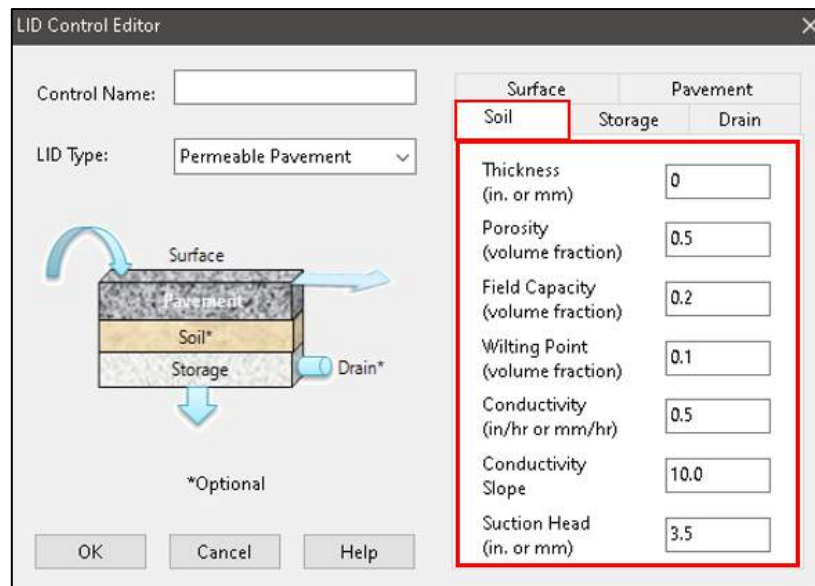


**Ilustración 50-3:** Parámetros definidos en la capa Drain

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

- **Pavimento permeable**

- Soil
- Thickness: Según el Instituto de Normalización Ecuatoriana (INEN) 1996, las vías transversales principales que soportan rutas regulares de autobuses con 25 a 50 vehículos de servicio público por día, en ambas direcciones, por esa razón se tomó una altura de 15 cm de arena graduada (Krause y Base, 2005, p.47).
- Porosity: Se determinó que el suelo apropiado era un suelo de tipo Sand (arena), y como resultado se designó un valor de 0,437.
- Field capacity: El valor de 0,062 se aplicó al mismo tipo de suelo que el anterior.
- Wilting Point: En relación al mismo tipo de suelo que el anterior, el valor empleado fue de 0.024.
- Conductivity: El valor para el tipo de suelo Arena fue de 4,74 pulg/h, que, convertido a unidades del sistema internacional, nos dio 120,40 mm/h (Krause y Base, 2005, p.47).
- Conductivity Slope: El porcentaje aplicado a los suelos de tipo Arena fue del 5%.
- Suction Head: Para el mismo tipo de suelo anterior, se utilizó el valor de 1,93 in, y al convertirlo a unidades del sistema internacional se obtuvo 49 mm.

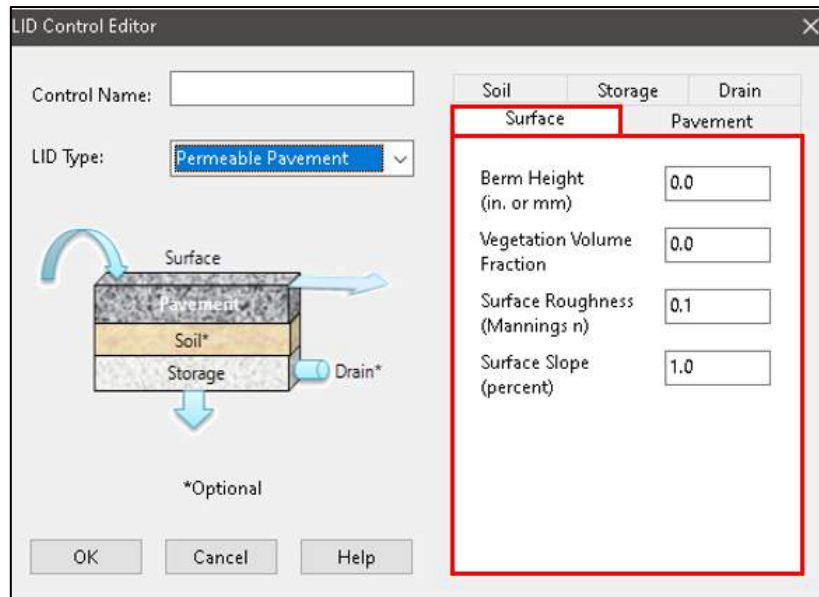


**Ilustración 51-3:** Parámetros definidos en la capa Soil

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

- Surface
- Berm Height: Para adaptarse a la altura del bordillo de la carretera o del aparcamiento, se ha elegido una altura de 15 cm.
- Vegetation Volume Fraction: Este tipo de elemento no empleó una capa vegetal, por lo que se utilizó un valor de 0.00.
- Surface Roughness: Dado que la superficie no era totalmente de hormigón (adoquines ecológicos), se eligió el valor de 0,011 de la tabla correspondiente para la rugosidad de la superficie (Yuan et al., 2019, p.24).
- Surface Slope: Dado que el SWMM 5.2.1 y el Manual de SUDS no especificaban un rango, se eligió un valor de 2% de pendiente para favorecer la infiltración en el suelo y porque la mayoría de ellos estuvieron situados en aparcamientos de la región con diferencias considerables de pendiente.

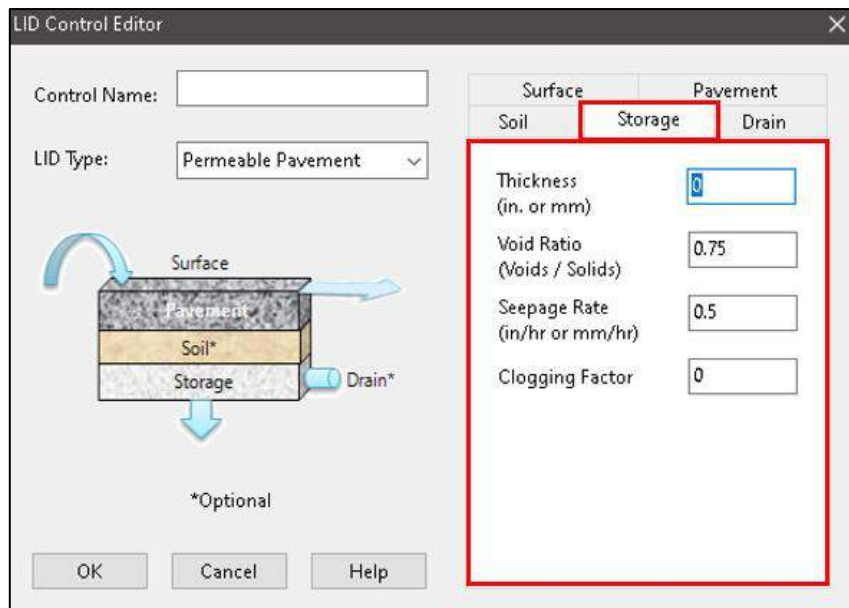




**Ilustración 52-3:** Parámetros definidos en la capa Surface

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

- Storage
- Thickness: Tras considerar la altura de las distintas capas de pavimento permeable y elegir un pavimento de categoría 5 para la zona, se decidió instalar una capa de almacenamiento de 15 cm.
- Void Ratio: Dado que se trató de un pavimento articulado, se definió el valor en relación a los vacíos para la arena limosa y el rango para esta clasificación del suelo que fue de 0,33 a 0,98. Para los fines de este proyecto de investigación, se eligió un valor intermedio de 0,60 lo que indicó que la arena tuvo un contenido medio de limo dentro de estos rangos.
- Seepage Rate: Se utilizó el valor de 4,71 mm/h como la tasa de infiltración mínima estimada por Horton para el suelo natural en la presente investigación (Bloorchian et al., 2016, p.70).
- Clogging Factor: Las zanjas de infiltración del tipo LID lo requieren, según el SWMM 5.2.1, y se aconseja que el elemento se mantenga continuamente, por esta razón no se ha tenido en cuenta en el proyecto presente.
- Drain: En las simulaciones realizadas para este elemento específico, no se consideró ningún tipo de drenaje ya que el nivel de agua no superó la capacidad de almacenamiento del elemento.

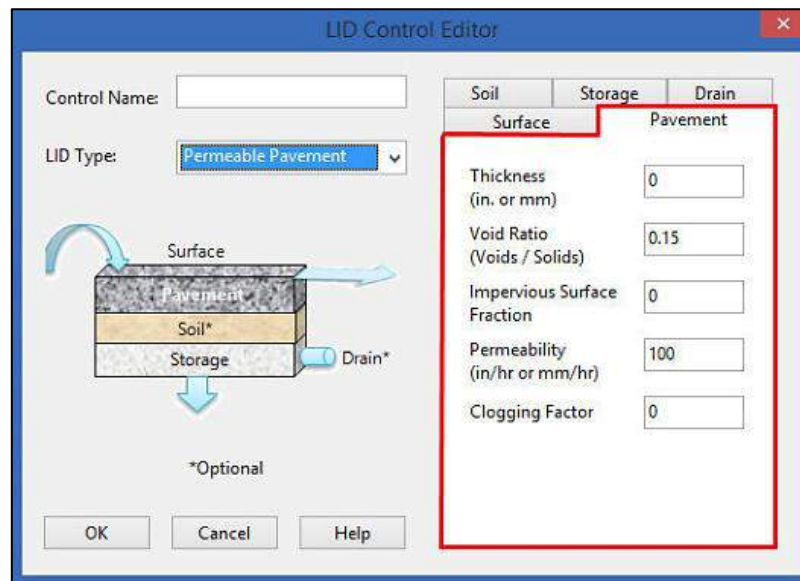


**Ilustración 53-3:** Parámetros definidos en la capa Storage

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

- Pavement: Capa particular que se utilizó para crear pavimentos porosos.
- Thickness: Determinó la altura de la capa de suelo (in o cm). Se eligió la altura de los adoquines ecológicos, que es de 10 cm, como altura adecuada.
- Void ratio (Void/Soils): Demostró cómo se relacionan el volumen de los vacíos y el volumen de los sólidos.
- Al tratarse de un pavimento articulado (pavimento hueco), el valor del material de relleno, en este caso la arena, se definió en función de los huecos, dándonos un valor entre 0,40 y 0,85. Para el proyecto se tomó un valor mínimo de 0,40, lo que implica que se trata de una arena con un ligero contenido de finos.
- Impervious Surface Fraction: Se refirió a la proporción de pavimento poroso respecto a la superficie total (Krause y Base, 2005, p.47).
- La relación de áreas para un metro cuadrado en el que caben cuatro adoquines fue de 0,24 m<sup>2</sup>/1,00 m<sup>2</sup>, que se estableció debido a las dimensiones de los adoquines. También se determinó la relación entre el área del pavimento y el área total en sistemas articulados.
- Permeability: Mostró el índice de permeabilidad del pavimento, que se utilizó para permitir que el agua se moviera rápidamente hacia la sub-base (in/h o mm/h).
- Para representar la arena, se registró un valor de 50 mm/h (Krause y Base, 2005, p.47).
- Clogging Factor: Fue el factor de obstrucción del pavimento permeable, o el valor que bloqueaba por completo la capacidad del pavimento para absorber el agua de escorrentía.
- No se tuvo en cuenta para esta investigación, pero se utilizó los datos de relación de vacíos

de la arena para mejorar la simulación.

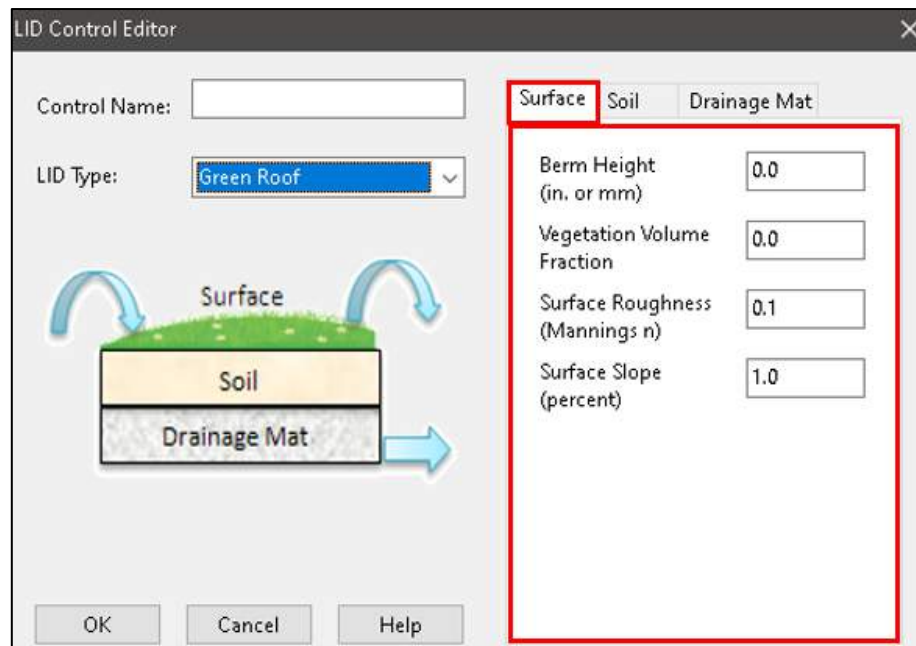


**Ilustración 54-3:** Parámetros definidos en la capa Pavement

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

- **Techos verdes**

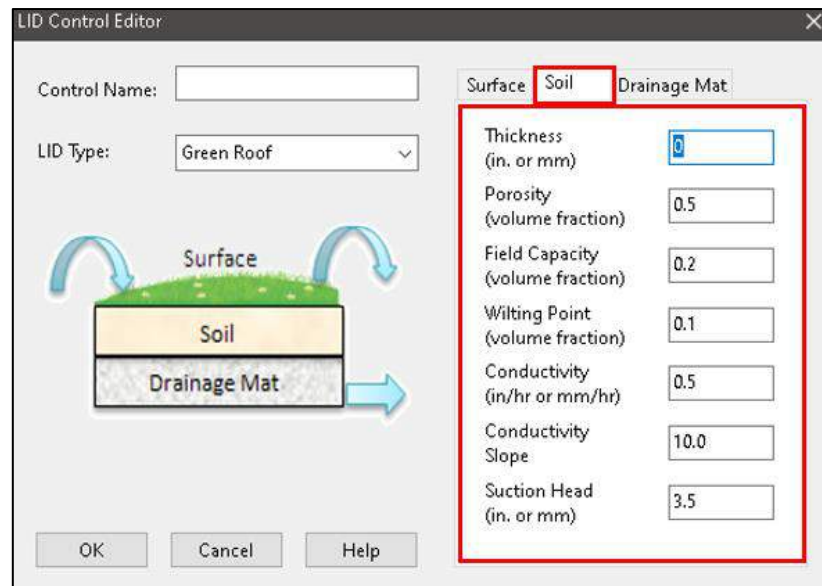
- Surface
- Berm Height: Para proteger y contener la cubierta vegetal, se colocó una altura de 5 cm.
- Vegetation Volume Fraction: El volumen de ocupación de las partes vegetales (tallos y hojas) en la capa superficial es indicado por el SWMM 5.2.1 como un rango de 0,00 a 0,20. Como se indicó anteriormente, se determinó que la capa superficial tenía una altura de 5 cm, es decir,  $0,05 \text{ m}^3$  con respecto al volumen de un metro cuadrado. Se calculó que los tallos y las hojas llenaban el 20% del espacio, que tenía un volumen de  $0,01 \text{ m}^3$ . El rango de ocupación máximo permitido era de  $0,01 \text{ m}^3$ , que estaba representado por una capa densa de césped con buen mantenimiento y hojas de 1 cm de altura. Sin embargo, se podrían haber plantado otros tipos de plantas, y dándoles suficiente espacio para que crecieran adecuadamente, el volumen de ocupación habría sido mucho menor (Czemieli, 2010, p.91).
- Surface Roughness: Se empleó la tabla correspondiente para rugosidad superficial y se escogió el valor de Césped denso que fue de 0.24.
- Surface Slope: Se eligió la pendiente mínima requerida para este tipo de elemento, que fue de 1,25%.



**Ilustración 55-3:** Parámetros definidos en la capa Surface

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

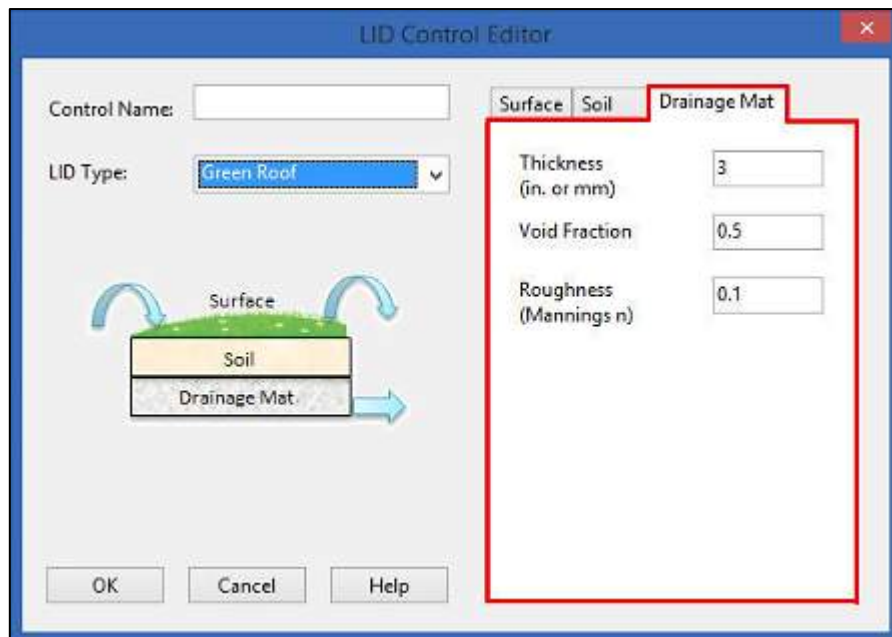
- Soil
- Thickness: Se eligió la altura de 12 cm, que equivalía a una altura de vegetación baja y con un almacenamiento de elementos de entre  $\pm 25$  y  $35 \text{ l/m}^2$ .
- Porosity: Se eligió como suelo adecuado un suelo del tipo franco arenoso, con un alto contenido de arena para ayudar a la filtración y está compuesto por limo, arcilla y arena. Se asignó un valor de 0,453 para este tipo de suelo (Yuan et al., 2019, p.24).
- Field capacity: Se aplicó un valor de 0,190 al mismo tipo de suelo que el anterior.
- Wilting Point: Para el mismo tipo de suelo, también se aplicó el valor de 0,085
- Conductivity: El tipo de suelo Sandy Loam (Marga arenosa), nos proporcionó un valor de 0,43 in/h, que se convirtió en 10,92 mm/h en el sistema internacional.
- Conductivity Slope: El valor para el tipo de suelo Sandy Loam fue del 7,5%.
- Suction Head: Sandy Loam nos proporcionó un valor de 4,33 in para este tipo de suelo, que se convirtió en 110 mm en el sistema internacional.



**Ilustración 56-3:** Parámetros definidos en la capa Soil

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

- Drainage mat: En las terrazas verdes, era la lámina de drenaje.
- Thickness: Determinó la altura de la capa de suelo a colocar (in o cm).
- De acuerdo con el criterio de baja altura de la vegetación, se eligió una altura de 5 cm, que correspondía a una altura compuesta entre el suelo y la capa de estera de drenaje de 165 mm. Esta altura también tenía un almacenamiento en el elemento de entre 25 y 35 l/m<sup>2</sup>.
- Void fraction: Fue el resultado de dividir el volumen de la capa y el volumen de los vacíos.
- Para el proyecto investigativo, se eligió un valor de 0,50, lo que indicaba que se trata de una grava sin contenido de limo o arena y que se determinó que la capa estaba constituida por grava triturada, lo que nos dio un valor entre 0,30 y 0,60. (grava limpia).
- Roughness: Se ajustó a la constante de Manning, que se utilizó para determinar el flujo horizontal en la capa de drenaje (Legates, 2007, p.88).
- Se utilizó un valor de 0,15 por ser el más cercano al mínimo estimado por SWMM 5.2.1, que advierte que no es exactamente el valor del producto estándar, sino un valor entre 0,1 y 0,4; así, se tuvo en cuenta la rugosidad mínima para simular el flujo en el sistema.



**Ilustración 57-3:** Parámetros definidos en la capa Drainage mat

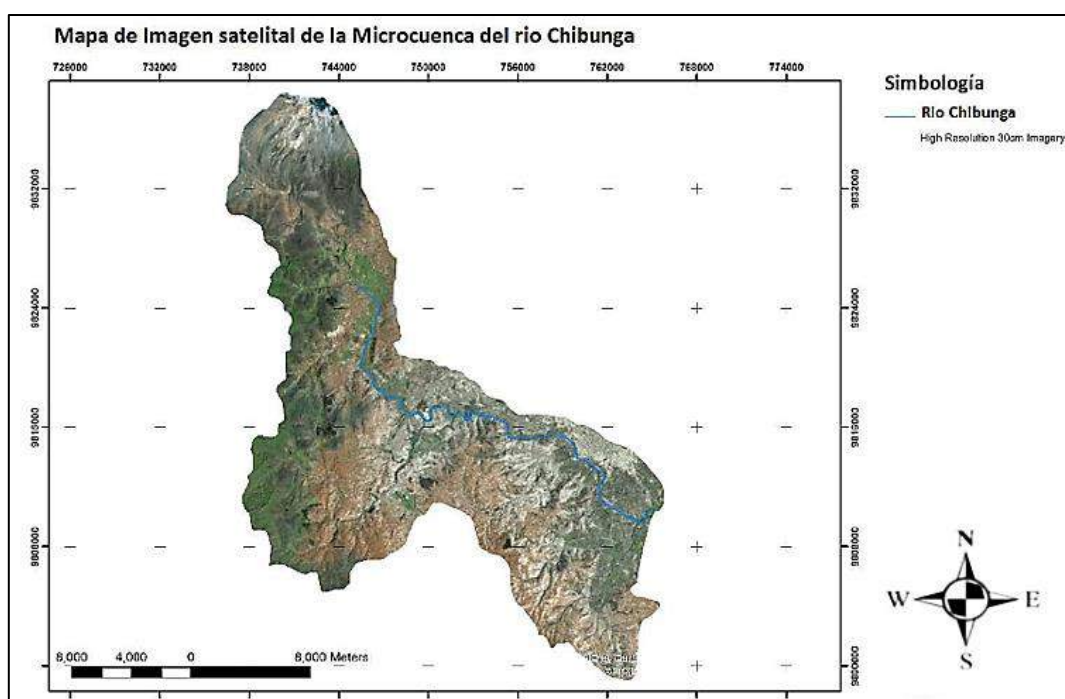
Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Microcuenca del río Chibunga

La microcuenca del río Chibunga que se encuentra delimitada al noroeste de la provincia de Chimborazo y que forma parte además a la subcuenca del río Chambo, se crea por los deshielos y vertientes pertenecientes del nevado Chimborazo, en donde en la parte alta el río adopta el nombre de este nevado, atraviesa en su recorrido la parroquia San Juan fluyendo hasta los 2900 m.s.n.m. donde se une con el río Sicalpa cerca de la fábrica Cemento Chimborazo. La microcuenca del río Chibunga, que desemboca en el río Chambo y atraviesa la ciudad de Riobamba de noroeste a sureste, es un recurso hídrico que ha tenido un impacto significativo en el crecimiento de esta ciudad.



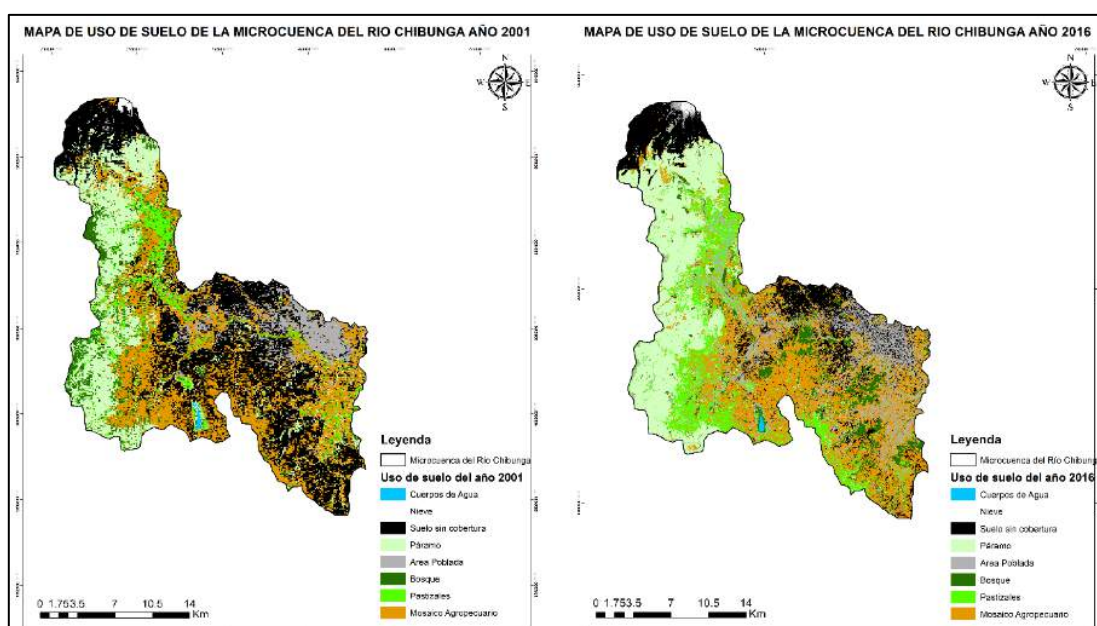
**Ilustración 58-4:** Mapa de imagen satelital de la Microcuenca del río Chibunga

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

#### 4.2. Clasificación de uso del suelo del río Chibunga para los años 2001 y 2016

Una vez procesadas las imágenes Landsat 7 y 8, se llevó a cabo una clasificación supervisada que permitió determinar e identificar las diferentes categorías de uso del suelo en la microcuenca del

río Chibunga para los años 2001 y 2016, lo que dio lugar a la creación del mapa de clasificación de uso del suelo de la microcuenca en estudio durante el periodo de tiempo descrito.



**Ilustración 59-4:** Mapa de clasificación de uso de suelo de la microcuenca del Río Chibunga de los años 2001 vs 2016, Chimborazo, Ecuador.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Cuerpos de agua, páramo, zona poblada, bosque, nieve, suelos sin cobertura, pastizales y mosaicos agropecuarios fueron las 8 clases de uso del suelo encontradas en esta área de estudio. En este procedimiento se emplearon herramientas de software de Arcgis 10.5.

**Tabla 14-4:** Análisis multitemporal de la clasificación de uso del suelo en la microcuenca del río Chibunga para los años 2001 y 2016

Clase de uso de suelo	(2001) ha	%	(2016) ha	%	D. de Crecimiento (ha)	Diferencia %	TAC (ha/año)
Cuerpo de Agua	83.92	0.16	64.11	0.12	-21.88	-0.03	-1.42
Nieve	131.31	0.25	94.66	0.18	-34.24	-0.06	-2.44
Suelo sin cobertura	17263.11	32.48	7638.55	14.37	-9428.11	-18.23	-625.62
Páramo	10609.13	19.96	13166.76	24.77	2556.74	4.53	173.61
Área poblada	3526.23	6.63	7078.37	13.32	3546.73	7.17	232.62
Bosque	4293.44	8.08	3642.87	6.85	-645.77	-1.66	-41.52
Pastizales	2830.12	5.32	6523.58	12.27	3683.52	6.47	247.62
Mosaico Agropecuario	14411.62	27.12	14728.86	27.71	320.11	0.74	20.38

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.



En base a los resultados generados se puede deducir que hubo cambios de uso del suelo en la microcuenca del río Chibunga entre los años 2001 y 2016, con una pérdida de 21.88 ha en los cuerpos de agua, una disminución de 34.24 ha en la nieve, una disminución de 9428.11 ha en el suelo sin cobertura, y una ganancia de 2556.74 ha en el páramo. Por otro parte, se determinó una ganancia de 3546.73 ha para la zona poblada, una pérdida de 645.77 ha para el bosque, un aumento de 3683.52 ha para los pastizales y una ganancia de 320.11 ha para el mosaico agropecuario.

De forma similar a la tabla anterior, se pudo identificar la tasa de cambio anual o el número de hectáreas por año. En base a lo mencionado, se obtuvo lo siguiente: los cuerpos de agua experimentaron una pérdida de 1.42 ha/año, la nieve experimentó una pérdida de 2.44 ha/año, así también, para el suelo sin cobertura se evidenció una pérdida de 625.62 ha/año, mientras que el páramo tuvo un aumento de 173.61 ha/año, en la zona poblada se evidenció una ganancia de 232.62 ha/año, mientras que el bosque se obtuvo una pérdida de 41.52 ha/año. Los pastizales, por su parte, registraron una ganancia de 247.62 ha/año, y finalmente para el mosaico agropecuario obtuvo una ganancia de 20.38 ha/año, en cuanto a la tasa de cambio anual.

### **4.3. Geomorfología de la microcuenca del río Chibunga**

El análisis geomorfológico de la microcuenca que se muestra a continuación permite comprender la influencia de la forma, relieve y sistema de drenaje en la unidad hidrográfica con las variaciones climáticas, precipitaciones y otros factores ambientales, revelando así el impacto de la conductancia hidráulica y las áreas potenciales afectadas por procesos de escorrentía del agua resultante de las precipitaciones generadas en la microcuenca (Rossman, 2015, p.63).

#### ***4.3.1. Resumen de características geomorfológicas de la microcuenca***

La siguiente tabla de resumen ofrece una visión general de los parámetros geométricos, relieve, sistema de drenaje e infiltración de la microcuenca en estudio:

**Tabla 15-4:** Parámetros geomorfológicos de la microcuenca.

Nombre	Sigla	Unidad	Valor
Área	A	Km <sup>2</sup>	488.35
Perímetro	P	Km	120.59
Cota máxima	Cmax	m.s.n.m.	6283
Cota mínima	Cmin	m.s.n.m.	2615
Centroide x	Cx	UTM	749.11
Centroide y	Cy	UTM	9817.35
Centroide z	Cz	m.s.n.m	3022
Índice de compacidad	le	adimensional	1.58
Longitud media	Le	Km	31.29
Factor de forma	Ff	adimensional	0.43
Relación de elongación	Re	adimensional	0.71
Relación de circularidad	Rci	adimensional	0.48
Área sobre la curva	As	Km <sup>2</sup>	1355410.04
Área bajo la curva	Ab	Km <sup>2</sup>	331312.56
Relación Hipsométrica	Rh	adimensional	4.15
Altitud media	Amed	msnm	3024
Altitud más frecuente	Amf	msnm	3359.98
Altitud de frecuencia media	Afrn	msnm	3858.16
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	24.73
Longitud del cauce principal	Lcp	m	5461142
Densidad de drenaje	Dd	Adimensional	0.21
Número de canales o ramales	Nt	Adimensional	12
Densidad hidrográfica	Dh	Km <sup>-1</sup>	0.03
Altura máxima del río	Hmax	Msnm	3885
Altura mínima del río	Hmin	Msnm	2610
Pendiente media del cauce principal	Sm	Adimensional	0.02

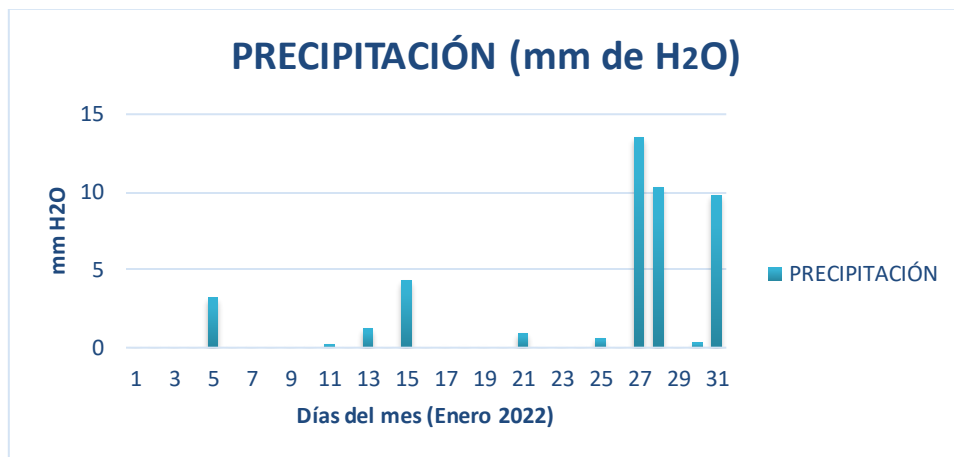
Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Según la tabla de resumen de resultados, la microcuenca del río Chibunga tiene una superficie de 488.35 km<sup>2</sup>, lo que la convierte en una cuenca de tamaño intermedio grande. El río principal, que tiene una longitud de 54.58 km y desemboca en el río Chambo, está orientado de noroeste a suroeste. Dado que la microcuenca es de tipo irregular y el índice de compacidad es de 1.58, existe la posibilidad de que sea cubierta por una tormenta, lo que podría alterar el tipo de respuesta presente en el río. Las inundaciones durante los periodos de fuertes lluvias se encuentran representados por el factor de forma con un valor de 0.43. La microcuenca tiene una pendiente media del 24.73%, lo que la hace de tipo accidentada. Además, el río contiene una amplia gama de climas y geología, así como un relieve relativamente importante, lo que demuestra la relación de elongación de 0.71. Los ríos Chimborazo y Sicalpa son de segundo orden, en tanto que la microcuenca del río Chibunga es de tercer orden, según la red de drenaje (Skala et al., 2020, p.81).

#### 4.4 Análisis de la variabilidad de precipitación efectuada durante el primer semestre del año 2022

Los siguientes resultados mensuales a continuación son para la variable Precipitación (mm H<sub>2</sub>O) para el primer semestre del año 2022. Los datos fueron tomados de la Estación Meteorológica de la ESPOCH (M1036) para el periodo de tiempo establecido.

Mes: Enero

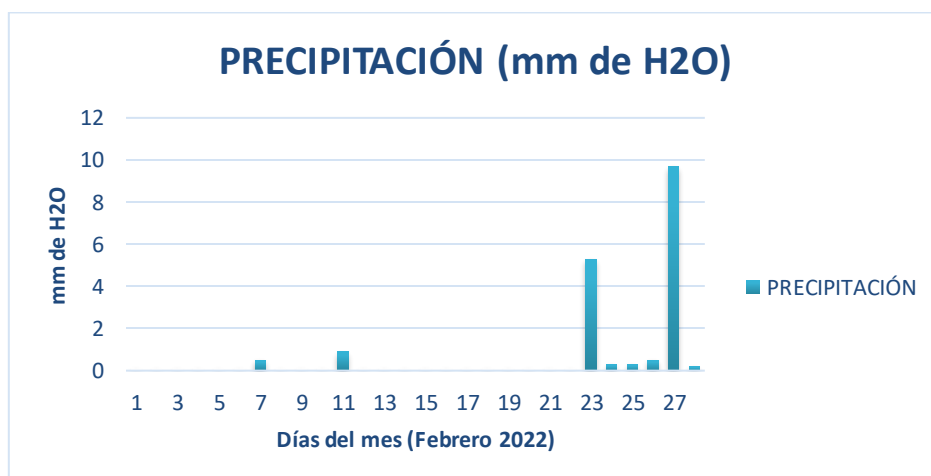


**Ilustración 60-4:** Variación de la precipitación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados obtenidos para la variable precipitación para el mes de enero del año 2022 demostraron que los días que presentaron mayor precipitación fueron los días 27, 28 y 31 con valores de 13.5, 10.30 y 9.8 mm de H<sub>2</sub>O respectivamente.

Mes: Febrero

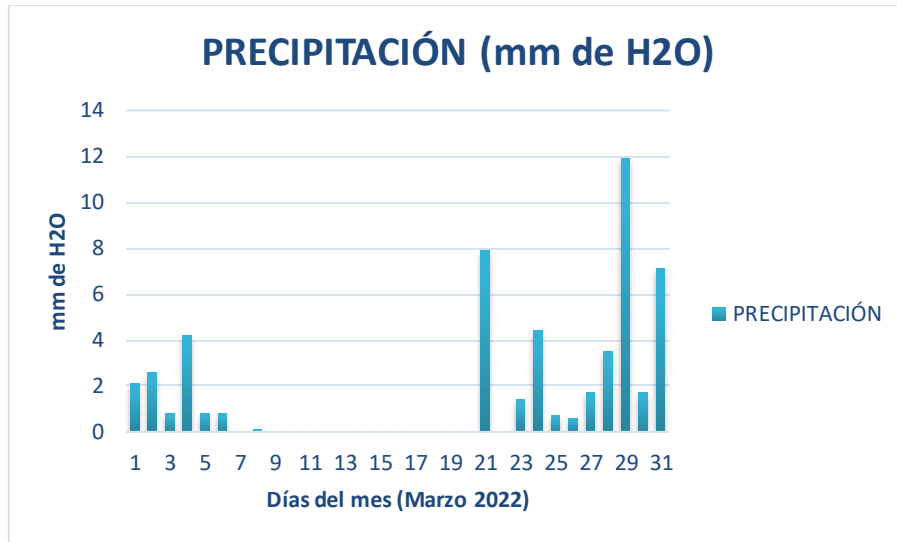


**Ilustración 61-4:** Variación de la precipitación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

En base a los resultados obtenidos para la variable precipitación para el mes de febrero del año 2022 demostraron que los días que presentaron mayor precipitación fueron los días 23 y 27 con valores de 5.3 y 9.7 mm de H<sub>2</sub>O respectivamente.

Mes: Marzo

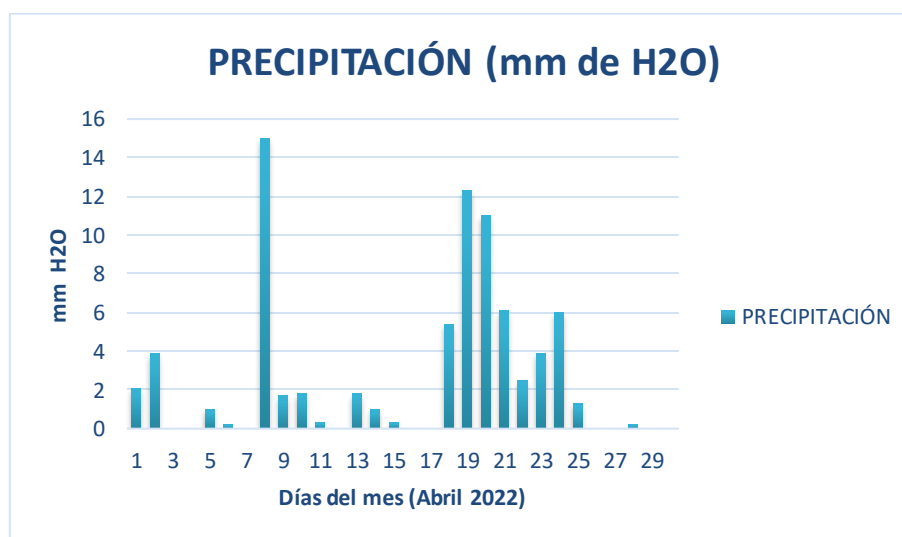


**Ilustración 62-4:** Variación de la precipitación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Según los resultados reflejados para la variable precipitación para el mes de marzo del año 2022 demostraron que los días que presentaron mayor precipitación fueron los días 21, 29 y 31 con valores de 7.90, 11.90 y 7.10 mm de H<sub>2</sub>O respectivamente.

Mes: Abril

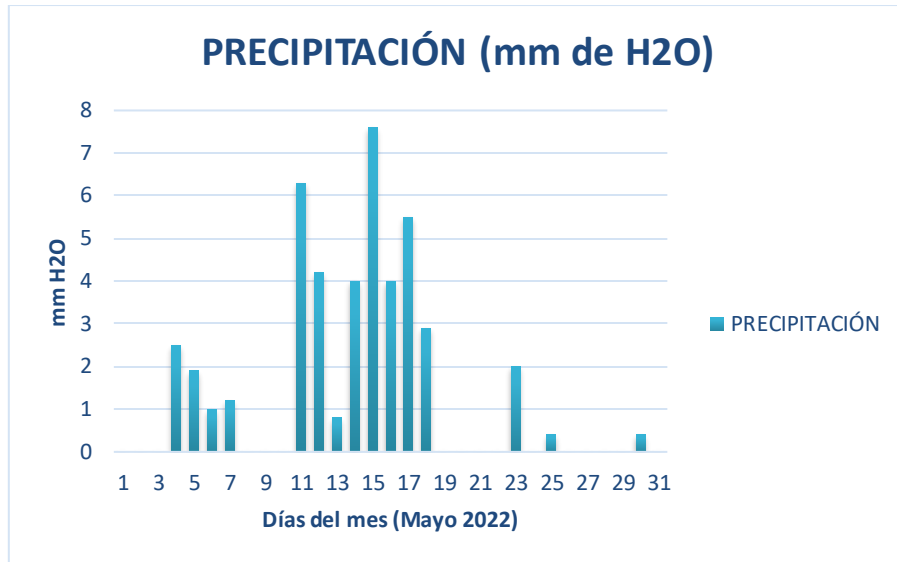


**Ilustración 63-4:** Variación de la precipitación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

En base a los resultados obtenidos para la variable precipitación para el mes de abril del año 2022 demostraron que los días que presentaron mayor precipitación fueron los días 8, 19 y 20 con valores de 15, 12.3 y 11 mm de H<sub>2</sub>O respectivamente.

Mes: Mayo



**Ilustración 64-4:** Variación de la precipitación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Según a los resultados obtenidos para la variable precipitación para el mes de mayo del año 2022 demostraron que los días que presentaron mayor precipitación fueron los días 11, 15 y 17 con valores de 6.3, 7.6 y 5.5 mm de H<sub>2</sub>O respectivamente.

Mes: Junio

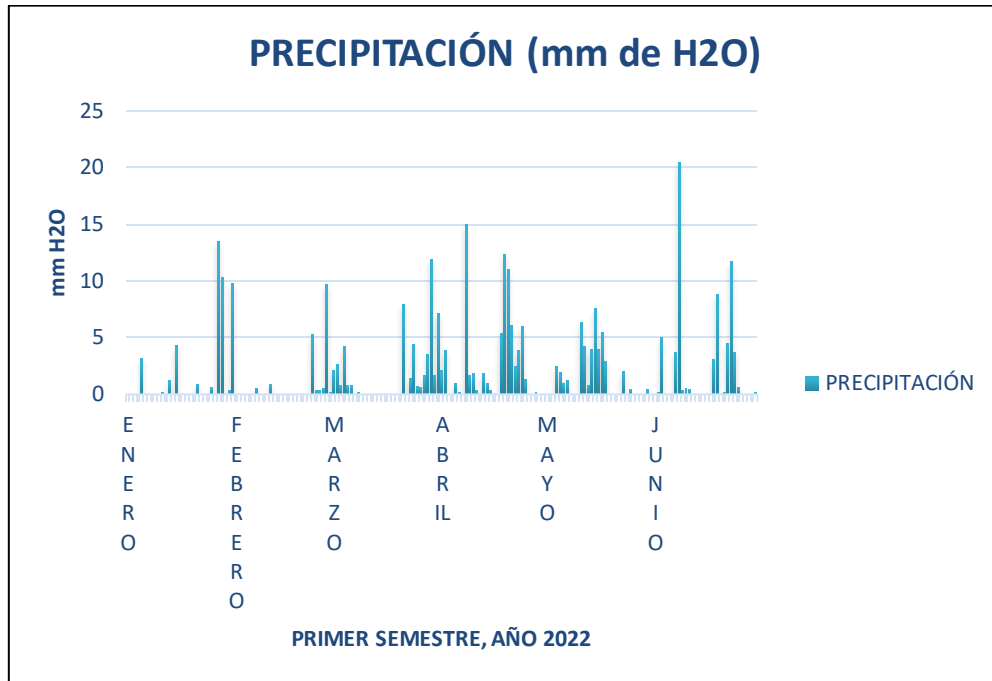


**Ilustración 65-4:** Variación de la precipitación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Finalmente, para el mes de sexto del año 2022 según los resultados obtenidos para la variable precipitación, demostraron que los días que presentaron mayor precipitación fueron los días 8, 19 y 23 con valores de 20.5, 8.8 y 11.7 mm de H<sub>2</sub>O respectivamente.

#### 4.4.1. Resumen semestral de la precipitación efectuada durante el año 2022

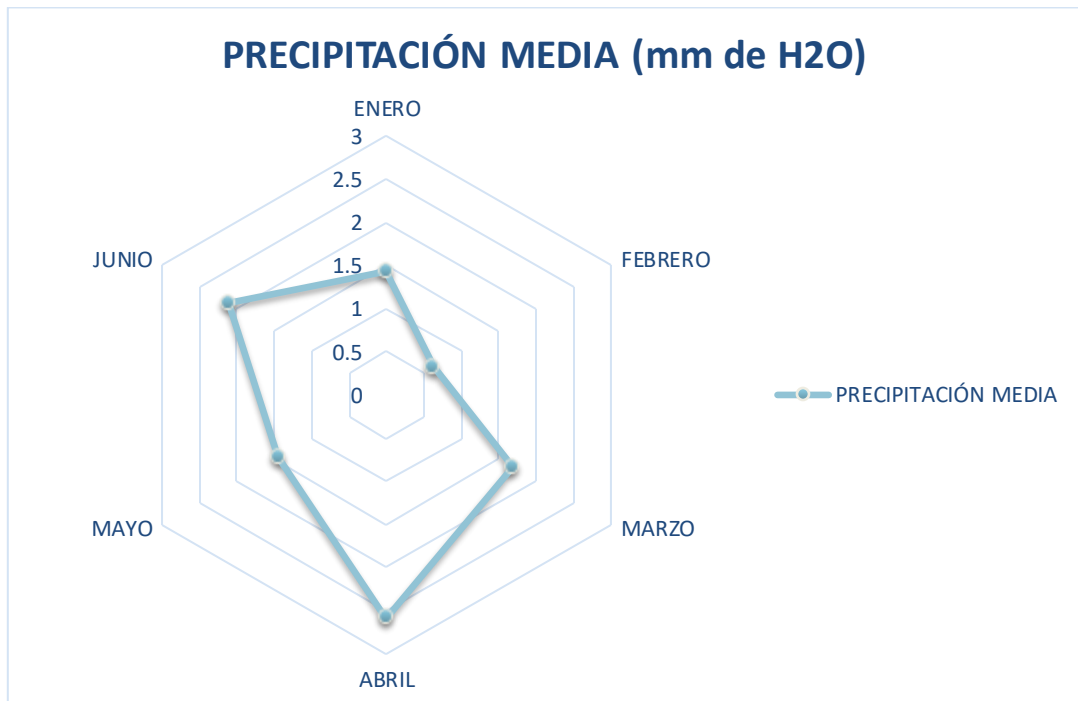


**Ilustración 66-4:** Resumen semestral de la precipitación dada durante el año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados obtenidos de la variable precipitación en la microcuenca del río Chibunga correspondientes al primer semestre del año 2022 demostraron que los meses con mayor frecuencia de precipitación fueron abril y junio, mientras que los meses con menor frecuencia de precipitación durante el primer semestre del año en curso fueron enero y febrero respectivamente. Este conjunto de datos obtenidos a partir de la representación gráfica de resultados nos permite identificar los meses que presenta mayor presencia del fenómeno de escorrentía producto de la precipitación en la zona de estudio y de esta manera poder tomar el conjunto de datos reflejados de esta variable para poder emplearlo dentro de los parámetros principales necesarios para la modelación mediante la utilización del Software SWMM 5.2.1.

#### 4.4.2. Resumen semestral de la precipitación media efectuada durante el año 2022



**Ilustración 67-4:** Resumen Semestral de la Precipitación media efectuada durante el año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados reflejan la precipitación media correspondientes al primer semestre del año 2022, los cuales demostraron que los meses con mayor precipitación media fueron abril y junio, con valores de 2.59 y 2.11 mm de H<sub>2</sub>O respectivamente, mientras que los meses que presentaron menor precipitación media durante el primer semestre del año en curso fueron enero y febrero los cuales tuvieron valores de 1.43 y 0.63 mm de H<sub>2</sub>O respectivamente.

#### 4.5. Análisis de la variabilidad de evaporación efectuada durante el primer semestre del año 2022

Los siguientes resultados mensuales a continuación son para la variable Evaporación (mm) para el primer semestre del año 2022. Los datos fueron tomados de la Estación Meteorológica de la ESPOCH (M1036) para el periodo de tiempo establecido.

Mes: Enero



**Ilustración 68-4:** Variación de la evaporación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados obtenidos para la variable evaporación para el mes de enero del año 2022 demostraron que los días que presentaron mayor evaporación fueron los días 5, 12 y 29 con valores de 7, 6.9 y 6.9 mm respectivamente.

Mes: Febrero



**Ilustración 69-4:** Variación de la evaporación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados obtenidos para la variable evaporación para el mes de febrero del año 2022 demostraron que los días que presentaron mayor evaporación fueron los días 4, 10 y 25 con valores de 6.5, 6.9 y 6.5 mm respectivamente.



Mes: Marzo

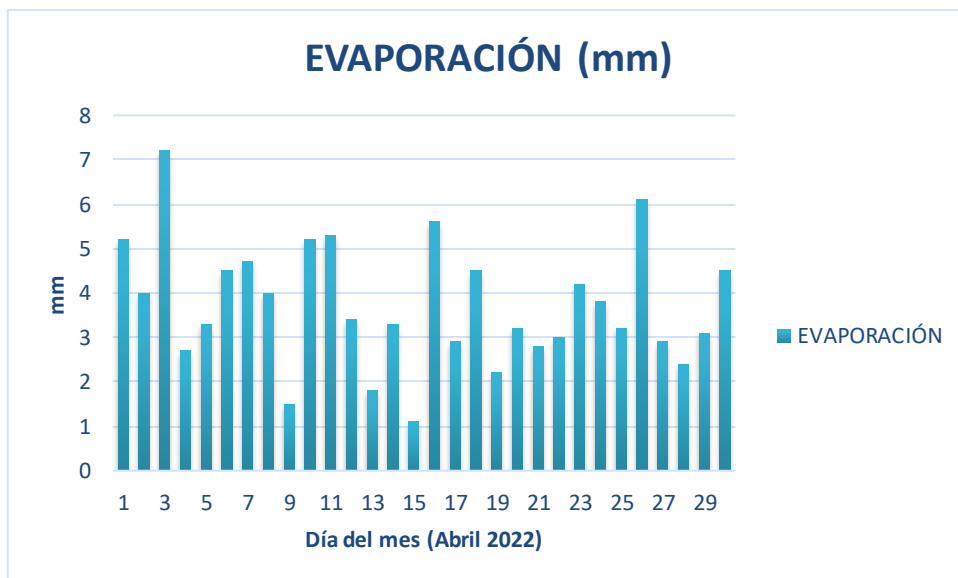


**Ilustración 70-4:** Variación de la evaporación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Para el mes de marzo del año 2022, en base a los resultados obtenidos para la variable evaporación demostraron que los días que presentaron mayor evaporación fueron los días 18, 22 y 23 con valores de 5.3, 6.5 y 5.5 mm respectivamente.

Mes: Abril



**Ilustración 71-4:** Variación de la evaporación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Según resultados obtenidos para la variable evaporación para el mes de abril del año 2022 demostraron que los días que presentaron mayor evaporación fueron los días 3, 16 y 26 con valores de 7.2, 5.6 y 6.1 mm respectivamente.

Mes: Mayo



**Ilustración 72-4:** Variación de la evaporación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Para el mes de mayo del año 2022, en base a los resultados obtenidos para la variable evaporación demostraron que los días que presentaron mayor evaporación fueron los días 3 y 7 con valores de 5.7 y 6 mm respectivamente.

Mes: Junio

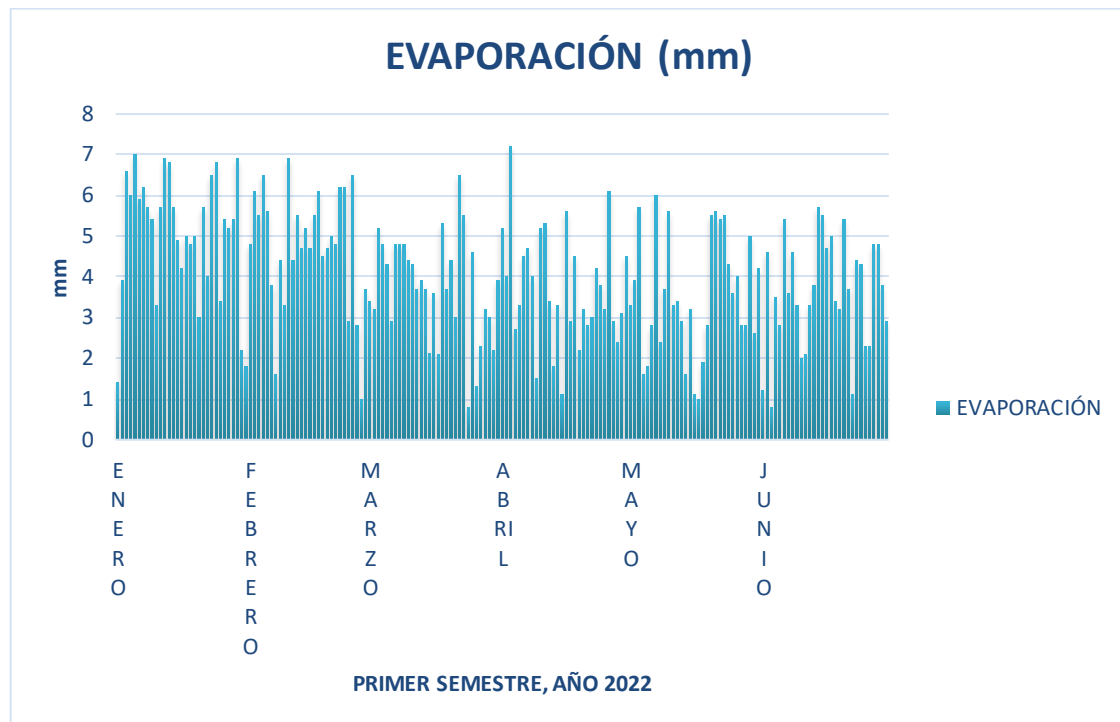


**Ilustración 73-4:** Variación de la evaporación mensual del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Finalmente, para el mes de sexto del año 2022 según los resultados obtenidos para la variable evaporación, demostraron que los días que presentaron mayor evaporación fueron los días 14 y 15 con valores de 5.7 y 5.5 mm respectivamente.

#### 4.5.1. Resumen semestral de la evaporación efectuada durante el año 2022



**Ilustración 74-4:** Resumen Semestral de la Evaporación efectuada durante el año 2022

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados obtenidos de la variable evaporación en la microcuenca del río Chibunga correspondientes al primer semestre del año 2022 demostraron que los meses con mayor frecuencia de evaporación fueron enero y febrero, mientras que los meses con menor frecuencia de evaporación durante el primer semestre del año en curso fueron mayo y junio respectivamente. Este conjunto de datos registrados en la representación gráfica de resultados, fueron obtenidos a través de la estación meteorológica de la ESPOCH, gracias a la información proveniente de Tanques de evaporación Clase A, los cuales estos a su vez los empleamos dentro de los parámetros principales necesarios para la modelación mediante la utilización del Software SWMM 5.2.1.

#### 4.5.2. Resumen semestral de la evaporación media efectuada durante el año 2022

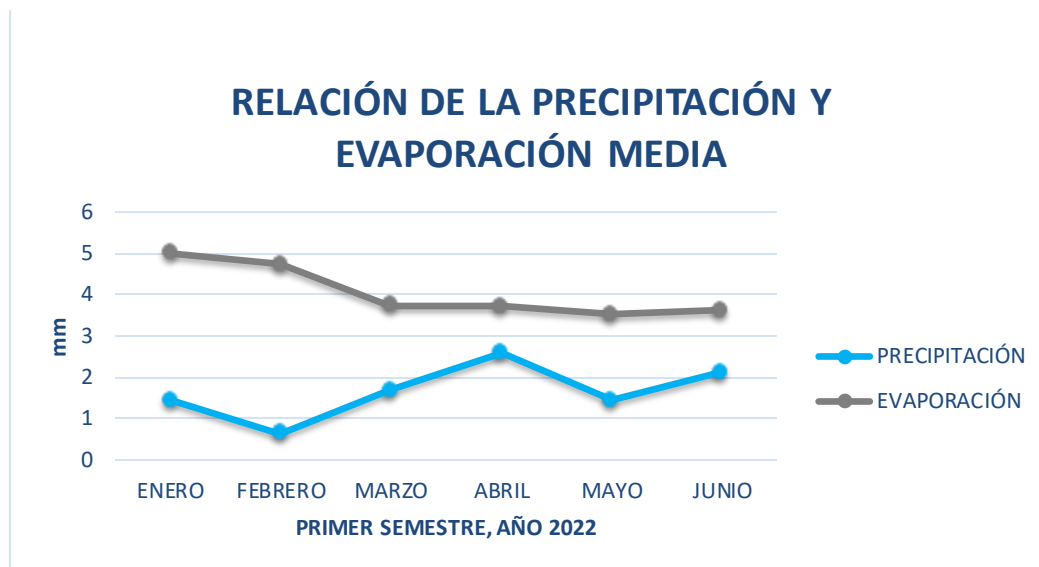


**Ilustración 75-4:** Resumen Semestral de la Evaporación media dada durante el año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados reflejan la evaporación media correspondiente al primer semestre del año 2022, en donde se evidenció que los meses con mayor evaporación media fueron enero y febrero, con valores de 5 y 4.74 mm respectivamente, mientras que los meses que presentaron menor evaporación media durante el primer semestre del año en curso fueron mayo y junio los cuales tuvieron valores de 3.53 y 3.61 mm respectivamente.

#### 4.6. Relación de la precipitación y evaporación media durante el primer semestre del año 2022



**Ilustración 76-4:** Relación de la Precipitación y la Evaporación media durante el primer semestre del año 2022

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

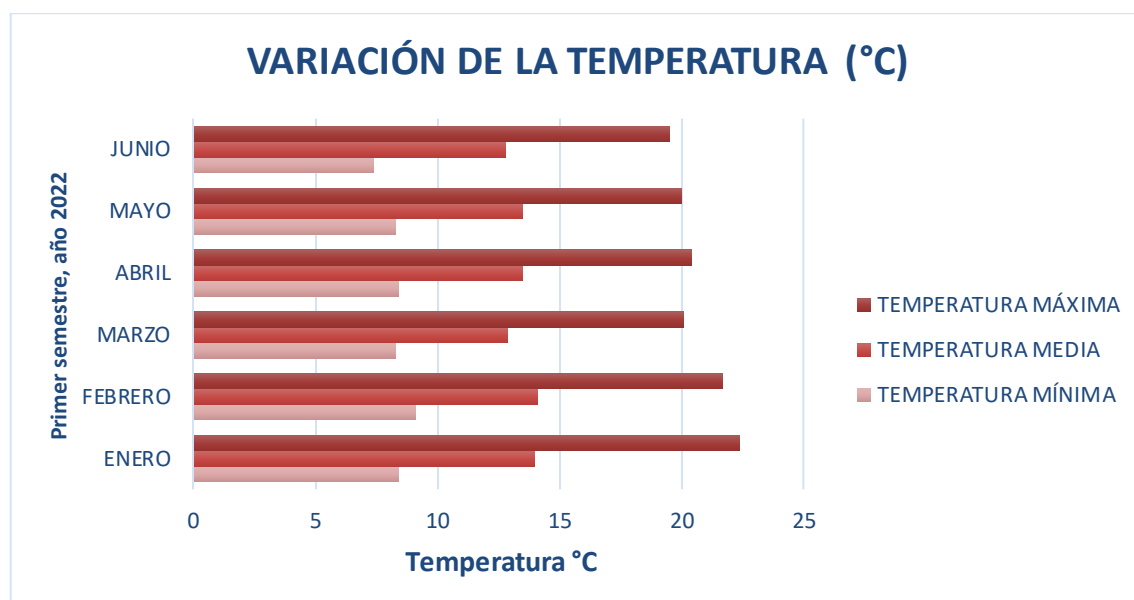
El presente resultado relaciona el comportamiento de la precipitación media versus la evaporación media efectuada durante el primer semestre del año 2022, en el cual se observó que los valores de evaporación registrados fueron mayores durante los meses de enero, febrero y parte de marzo, mientras que se registraron valores bajos para la variable precipitación para los mismos meses; esto se debe a que la temperatura media de esos mismos meses fue alta, lo que indica que se produjo una mayor evaporación del agua. Por otra parte, en lo que respecta a los meses de abril y junio, la precipitación presentó valores más altos en comparación con la evaporación, aunque estos fueron parcialmente cercanos debido a que hubo una disminución relativa de la temperatura durante este periodo.

De hecho, uno de los factores que afectó a la evaporación era la temperatura, que a su vez fue modificada por el régimen de precipitación, lo que dio lugar a una correlación entre estos parámetros climáticos. La excesiva precipitación daba lugar al descenso de la temperatura, impidiendo que el sol calentara las masas de agua para producir más evaporación, por lo que la evaporación durante este periodo de lluvia fue casi siempre inferior a los niveles de precipitación. Por el contrario, cuando las lluvias eran muy escasas, los rayos solares calentaban intensamente las aguas superficiales, convirtiéndolas en vapor de agua, lo que elevaba consecutivamente los niveles de evaporación.

El análisis de estos resultados en cuanto a la relación entre la variable precipitación y la evaporación media, permitió identificar la importancia de la temperatura en la variación de estos parámetros, por lo que también se determinó la variabilidad mensual durante el primer semestre del año 2022 para la temperatura.

#### 4.7. Análisis de la variabilidad de temperatura mensual efectuada durante el primer semestre del año 2022

Los siguientes resultados mensuales a continuación son para la variable Temperatura (°C) para el primer semestre del año 2022. Los datos fueron tomados de la Estación Meteorológica de la ESPOCH (M1036) para el periodo de tiempo establecido.



**Ilustración 77-4:** Variación de la temperatura mensual efectuada durante el primer semestre del año 2022.

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

En base a los resultados generados, estos representaron la variación máxima, media y mínima mensual de la temperatura en la microcuenca del río Chibunga efectuada durante el primer semestre del año 2022, en donde se tuvo como resultado que los meses de enero y febrero tuvieron temperaturas máximas con valores de 22.4 y 21.7 °C, mientras que los meses con las menores temperaturas máximas fueron marzo y junio con valores de 20.1 y 19.5°C respectivamente. Los meses de enero y febrero a su vez también, presentaron las mayores temperaturas medias registradas con valores de 14 y 14.1 °C, mientras que en los meses de marzo y junio se registraron valores de 12.9 y 12.8 °C.

Finalmente, en cuanto a las temperaturas mínimas registradas, al igual que los meses anteriores, enero y febrero tuvieron los valores más altos que fueron 8.4 y 9.1 °C, en cambio valores de 8.3 y 7.4 representaron los meses de mayo y junio del año en curso.

#### 4.8. Modelación con PC-SWMM

Para el presente proyecto de investigación se ejecutaron diferentes escenarios de modelación, decidido de esta forma para poder comparar los resultados y a través de las diferentes simulaciones hidrológicas ejecutadas por el software SWMM 5.2.1, mostrar la importancia y utilidad de los sistemas de drenaje sostenible (LIDS).

Los resultados a continuación, fueron obtenidos de cada uno de los escenarios de modelación de manera específica (Techos verdes, cuencas de biorretención y pavimentos permeables) considerando cada uno de los parámetros óptimos descritos en la metodología necesarios para llevar a cabo los escenarios de simulación LID.

##### 4.8.1. Resumen de los parámetros obtenidos para las alternativas LID

###### Alternativa 1: Cubierta Verde

**Tabla 16-4:** Resumen de datos fijados para LID control (cubierta verde).

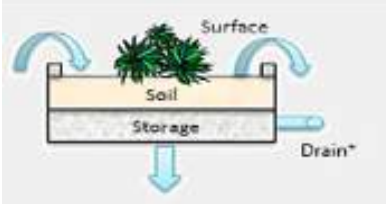
CUBIERTA VERDE		
CAPA	DESCRIPCIÓN	VALOR UTILIZADO
SURFACE	Berm Height	50 mm
	Vegetation volume fraction	0.2
	Surface Roughness	0.24
	Surface Slope	1.25%
SOIL	Thickness	120 mm
	Porosity	0.453
	Field Capacity	0.19
	Wilting Point	0.085
	Conductivity	10.92 mm/h
	Conductivity Slope	7.50%
	Suction Head	110 mm

<b>DRAINAGE MAT</b>	Thickness	50 mm
	Void Fraction	0.5
	Roughness	0.15

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

## Alternativa 2: Cuenca de biorretención

**Tabla 17-4:** Resumen de datos ingresados para LID Control (Cuenca de Biorretención).

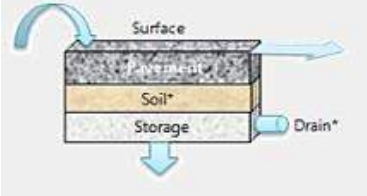
<b>CUENCA DE BIORRETENCIÓN</b>		
		
<b>CAPA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>VALOR UTILIZADO</b>
<b>SURFACE</b>	Berm Height	400 mm
	Vegetation volume fraction	0.2
	Surface Roughness	0.24
	Surface Slope	1%
<b>SOIL</b>	Thickness	500 mm
	Porosity	0.453
	Field Capacity	0.19
	Wilting Point	0.085
	Conductivity	10.92 mm/h
	Conductivity Slope	7.50%
	Suction Head	110 mm
<b>STORAGE</b>	Thickness	500 mm
	Void Fraction	0.5
	Seepage Rate	4.71mm/h
	Clogging Factor	0
<b>DRAIN</b>	No es considerado	

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.



**Alternativa 3:** Pavimento permeable

**Tabla 18-4:** Resumen de datos para LID Control (Pavimento permeable).

PAVIMENTO PERMEABLE		
		
CAPA	DESCRIPCIÓN	VALOR UTILIZADO
<b>SURFACE</b>	Berm Height	150 mm
	Vegetation volume fraction	0
	Surface Roughness	0.011
	Surface Slope	2%
<b>PAVEMENT</b>	Thickness	10 mm
	Void Ratio	0.4
	Impervious Surface	0.32
	Permeability	50 mm/h
	Clogging factor	0
<b>SOIL</b>	Thickness	150 mm
	Porosity	0.437
	Field Capacity	0.062
	Wilting Point	0.024
	Conductivity	120.4
	Conductivity Slope	5%
<b>STORAGE</b>	Thickness	150 mm
	Void Fraction	0.6
	Seepage Rate	4.71
	Clogging Factor	0
<b>DRAIN</b>	No es considerado	

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

**4.8.2. Escenarios LID mediante el uso de SWMM 5.2.1**

**4.8.2.1. Escenario de simulación sin la aplicación de alternativas LID**

En el primer escenario de simulación correspondiente a la microcuenca del río Chibunga sin aplicar ningún tipo de medida de drenaje sostenible nos permitió tener una visualización clara del

funcionamiento común que se ha venido generando dentro del sistema, en donde el escenario ha sido planteado directamente sin incorporar ninguna tecnología LID y ha funcionado como base para poder establecer una comparativa con las posteriores alternativas sostenibles que se han incorporado mediante la modelación con el software.

```

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.2 (Build 5.2.1)
-----
*****
Analysis Options
*****
Flow Units ..... CHS
Process Models:
  Rainfall/Runoff ..... YES
  RDII ..... NO
  Snowmelt ..... NO
  Groundwater ..... NO
  Flow Routing ..... YES
  Ponding Allowed ..... NO
  Water Quality ..... NO
Infiltration Method ..... HORTON
Flow Routing Method ..... STEADY
Starting Date ..... 01/01/2022 01:00:00
Ending Date ..... 06/30/2022 01:00:00
Antecedent Dry Days ..... 0.0
Report Time Step ..... 00:15:00
Wet Time Step ..... 00:05:00
Dry Time Step ..... 01:00:00
Routing Time Step ..... 20.00 sec

*****
Runoff Quantity Continuity
*****
Total Precipitation ..... 7317.560      149.950
Evaporation Loss ..... 0.000          0.000
Infiltration Loss ..... 3512.428      71.976
Surface Runoff ..... 3648.044        74.755
Final Storage ..... 157.139          3.220
Continuity Error (%) ..... -0.001
  
```

**Ilustración 78-4:** Reporte de escorrentía obtenido del Software sin la aplicación de LID.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los datos generados por el Software SWMM versión 5.2.1 una vez establecido e ingresado todos los parámetros definidos con los que trabaja el programa, se ejecutó considerando cada uno de los escenarios en estudio. Los modelos procesados dentro del programa fueron Runoff (escorrentía), Flow Routing (enrutamiento de flujo), método de infiltración que fue por el de Horton, y método de enrutamiento de flujo que fue el de Steady. La fecha de inicio y fin considerada para la modelación fue del 1 de enero al 30 de junio del año en curso y el informe de paso del tiempo reflejado para la simulación fue cada 15 minutos.

En lo que refiere al reporte de continuidad de la cantidad de escorrentía se obtuvo que en este primer escenario de simulación sin la aplicación de tecnologías LID, la precipitación total registrada para este intervalo de tiempo fue de 7317.560 hectare-m equivalente a 73175600 m<sup>3</sup>

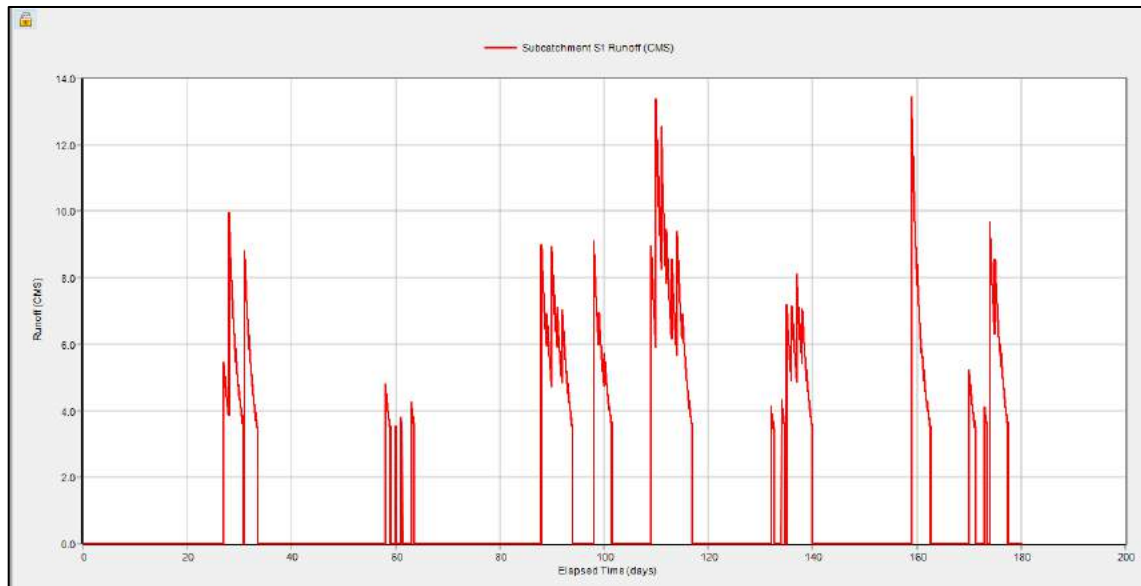
(1 hectare-m es igual a  $10000 \text{ m}^3$ ) es decir, 149.950 mm de profundidad de lluvia en toda la microcuenca durante un evento de 30 minutos. El total registrado para pérdidas de infiltración fue de  $35124280 \text{ m}^3$  equivalente a 71.976 mm de profundidad de agua de lluvia infiltrada en las zonas permeables. La escorrentía superficial registrada por su parte, fue de  $36480440 \text{ m}^3$  equivalente a 74.755 mm de profundidad de lluvia en zonas impermeables. El almacenamiento final en la microcuenca tuvo  $1571390 \text{ m}^3$  correspondiente a 3.220 mm de profundidad de agua de lluvia, que fue considerada como la cantidad de agua que permaneció en los depósitos. Finalmente, en base al registro del error de continuidad en este primer escenario de simulación, la diferencia entre las entradas y salidas de agua en el sistema dio un valor de  $-0.001 \%$ , siendo inferior a  $\pm 5\%$  lo que se considera un error aceptable.

Topic: Subcatchment Runoff <span style="float: right;">Click a column header to sort the column.</span>										
Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Imperv Runoff mm	Perv Runoff mm	Total Runoff mm	Total Runoff $10^6 \text{ ltr}$	Peak Runoff CMS	Runoff Coeff
S1	149.95	0.00	0.00	71.98	74.75	0.00	74.76	36480.65	13.44	0.499

**Ilustración 79-4:** Resumen del reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software sin la aplicación de LIDS.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

#### Serie de tiempo de la variable escorrentía sin alternativas LID en CMS ( $\text{m}^3/\text{s}$ )



**Ilustración 80-4:** Serie de tiempo de la variable escorrentía en CMS ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) sin alternativa LID

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados reflejados de la serie de tiempo para el primer escenario correspondiente al modelado sin la incorporación de alternativas LID, fueron obtenidos a través de la opción Time Series Plot, incorporada en el Software SWMM 5.2.1, el cual permitió analizar el comportamiento de la escorrentía superficial expresada en CMS ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) en la microcuenca del río Chibunga correspondiente al primer semestre (expresado en días) del presente año, en donde se demostró que en el mes de enero el valor más alto de escorrentía registrado fue de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , el mes de febrero tuvo  $8.89 \text{ m}^3/\text{s}$  como el mayor valor de escorrentía superficial, consecutivamente en el mes de marzo el pico más alto alcanzado fue de  $9 \text{ m}^3/\text{s}$ , seguido del mes de abril donde el valor más alto de escorrentía fue de  $13.50 \text{ m}^3/\text{s}$ , para el mes de mayo el valor máximo llegó a  $8.05 \text{ m}^3/\text{s}$  y finalmente para el mes de junio el pico más alto alcanzado de escorrentía fue de  $13.55 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente.

#### 4.8.2.2. Escenario de simulación aplicando la alternativa sostenible 1 (techo verde)

```

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.2 (Build 5.2.1)
-----
*****
Analysis Options
*****
Flow Units ..... CMS
Process Models:
  Rainfall/Runoff ..... YES
  RDII ..... NO
  Snowmelt ..... NO
  Groundwater ..... NO
  Flow Routing ..... YES
  Ponding Allowed ..... NO
  Water Quality ..... NO
Infiltration Method ..... HORTON
Flow Routing Method ..... STEADY
Starting Date ..... 01/01/2022 01:00:00
Ending Date ..... 06/30/2022 01:00:00
Antecedent Dry Days ..... 0.0
Report Time Step ..... 00:15:00
Wet Time Step ..... 00:05:00
Dry Time Step ..... 01:00:00
Routing Time Step ..... 20.00 sec

*****
Runoff Quantity Continuity
*****
          Volume          Depth
Runoff Quantity Continuity  hectare-m      mm
-----
Initial LID Storage .....      49.776      1.020
Total Precipitation .....    7317.560    149.950
Evaporation Loss .....           0.000      0.000
Infiltration Loss .....    3161.185     64.778
Surface Runoff .....    1621.881     33.235
LID Drainage .....    1665.335     34.126
Final Storage .....       919.036     18.833
Continuity Error (%) .....        -0.001

```

**Ilustración 81-4:** Reporte de continuidad de escorrentía obtenido del software aplicando la alternativa sostenible 1

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Los datos proporcionados por el Software SWMM 5.2.1 una vez establecido e ingresado todos los parámetros definidos con los que trabaja el programa, se ejecutó considerando la alternativa sostenible 1 denominada Techos verdes. Los modelos procesados dentro del programa fueron Runoff (escorrentía), Flow Routing (enrutamiento de flujo), método de infiltración que fue por el de Horton, y método de enrutamiento de flujo que fue el de Steady. La fecha de inicio y fin considerada para la modelación fue del 1 de enero al 30 de junio del año en curso y el informe de paso del tiempo reflejado para la simulación fue cada 15 minutos. En lo que refiere al reporte de continuidad de la cantidad de escorrentía se obtuvo que en este segundo escenario de simulación aplicando la alternativa sostenible 1 denominada Techos verdes, la precipitación total registrada para este intervalo de tiempo fue de 7317.560 hectare-m equivalente a 73175600 m<sup>3</sup>, es decir 149.950 mm de profundidad de lluvia en toda la microcuenca durante un evento de 30 minutos. El almacenamiento LID inicial tuvo un valor de 497760 m<sup>3</sup> equivalente a 1.020 mm de profundidad de agua de lluvia.

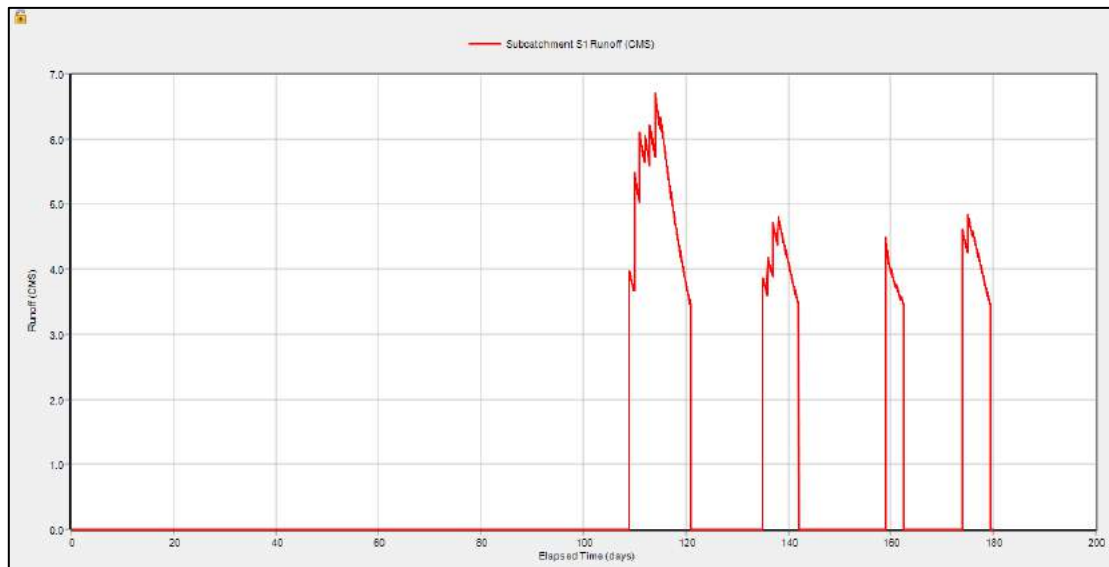
El total registrado para pérdidas de infiltración fue de 31611850 m<sup>3</sup> equivalente a 64.778 mm de profundidad de agua de lluvia infiltrada en las zonas permeables. La escorrentía superficial registrada por su parte, fue de 16218810 m<sup>3</sup> equivalente a 33.235 mm de profundidad de lluvia en zonas impermeables. En cuanto al drenaje LID, se obtuvo un valor de 16653350 m<sup>3</sup> que fue equivalente a la cantidad de agua resultante de la alternativa sostenible que fue de 34.126 mm de agua. El almacenamiento final en la microcuenca tuvo 9190360 m<sup>3</sup> correspondiente a 18.833 mm de profundidad de agua de lluvia, que fue considerada como la cantidad de agua que permaneció en los depósitos. Finalmente, en base al registro del error de continuidad en este segundo escenario de simulación, la diferencia entre las entradas y salidas de agua en el sistema dio un valor de -0.001 %, siendo inferior a ±5% lo que se considera un error aceptable.

Topic: Subcatchment Runoff <span style="float: right;">Click a column header to sort the column.</span>										
Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Imperv Runoff mm	Perv Runoff mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>6</sup> ltr	Peak Runoff CMS	Runoff Coeff
S1	149.95	0.00	0.00	64.78	67.46	0.00	67.36	32872.35	6.70	0.449

**Ilustración 82-4:** Resumen del reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 1.

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

### Serie de tiempo de la variable escorrentía mediante alternativa LID (techo verde) en CMS ( $m^3/s$ )



**Ilustración 83-4:** Serie de Tiempo de la variable escorrentía en CMS ( $m^3/s$ ), aplicando la alternativa sostenible 1.

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados reflejados de la serie de tiempo para el segundo escenario correspondiente a la alternativa sostenible 1 (techos verdes), fueron obtenidos a través de la opción Time Series Plot, incorporada en el Software SWMM 5.2.1, el cual permitió analizar el comportamiento de la escorrentía superficial expresada en CMS ( $m^3/s$ ) en la microcuenca del río Chibunga correspondiente al primer semestre (expresado en días) del presente año, en donde se demostró que durante los 3 primeros meses no se registraron picos de escorrentía superficial, esto fue debido a las características propias de la alternativa sostenible incorporada en el sistema, sin embargo en el mes de abril el valor más alto de escorrentía registrado fue de  $6.75 m^3/s$ , para el mes de mayo el valor máximo llegó a  $4.80 m^3/s$  y finalmente para el mes de junio el pico más alto alcanzado de escorrentía fue de  $4.83 m^3/s$  respectivamente.

4.8.2.3. Escenario de simulación aplicando la alternativa sostenible 2 (cuena de bio-retención)

```

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.2 (Build 5.2.1)
-----
*****
Analysis Options
*****
Flow Units ..... CMS
Process Models:
  Rainfall/Runoff ..... YES
  RDII ..... NO
  Snowmelt ..... NO
  Groundwater ..... NO
  Flow Routing ..... YES
  Ponding Allowed ..... NO
  Water Quality ..... NO
  Infiltration Method ..... HORTON
  Flow Routing Method ..... STEADY
  Starting Date ..... 01/01/2022 01:00:00
  Ending Date ..... 06/30/2022 01:00:00
  Antecedent Dry Days ..... 0.0
  Report Time Step ..... 00:15:00
  Wet Time Step ..... 00:05:00
  Dry Time Step ..... 01:00:00
  Routing Time Step ..... 20.00 sec

*****
                                Volume      Depth
Runoff Quantity Continuity      hectare-m      mm
*****
Initial LID Storage .....          0.501          0.010
Total Precipitation .....       7317.560       149.950
Evaporation Loss .....              0.000          0.000
Infiltration Loss .....          3731.160         76.458
Surface Runoff .....             3421.190         70.106
Final Storage .....              165.763          3.397
Continuity Error (%) .....         -0.001

```

**Ilustración 84-4:** Reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 2.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

La alternativa sostenible 2 denominada cuencas de biorretención, se llevó a cabo una vez establecido e ingresado todos los parámetros definidos con los que trabajó el Software SWMM 5.2.1. Los modelos procesados dentro del programa fueron Runoff (escorrentía), Flow Routing (enrutamiento de flujo), método de infiltración que fue por el de Horton, y método de enrutamiento de flujo que fue el de Steady. La fecha de inicio y fin considerada para la modelación fue del 1 de enero al 30 de junio del año en curso y el informe de paso del tiempo reflejado para la simulación fue cada 15 minutos. En lo que refiere al reporte de continuidad de la cantidad de escorrentía se obtuvo que en este tercer escenario de simulación aplicando la alternativa sostenible 2 denominada cuencas de biorretención, la precipitación total registrada para este intervalo de tiempo fue de 7317.560 hectare-m equivalente a 73175600 m<sup>3</sup>, es decir 149.950 mm de

profundidad de lluvia en toda la microcuenca durante un evento de 30 minutos. El almacenamiento LID inicial tuvo un valor de 5010 m<sup>3</sup> equivalente a 0.010 mm de profundidad de agua de lluvia. El total registrado para pérdidas de infiltración fue de 37311600 m<sup>3</sup> equivalente a 76.458 mm de profundidad de agua de lluvia infiltrada en las zonas permeables. La escorrentía superficial registrada por su parte, fue de 34211900 m<sup>3</sup> equivalente a 70.106 mm de profundidad de lluvia en zonas impermeables.

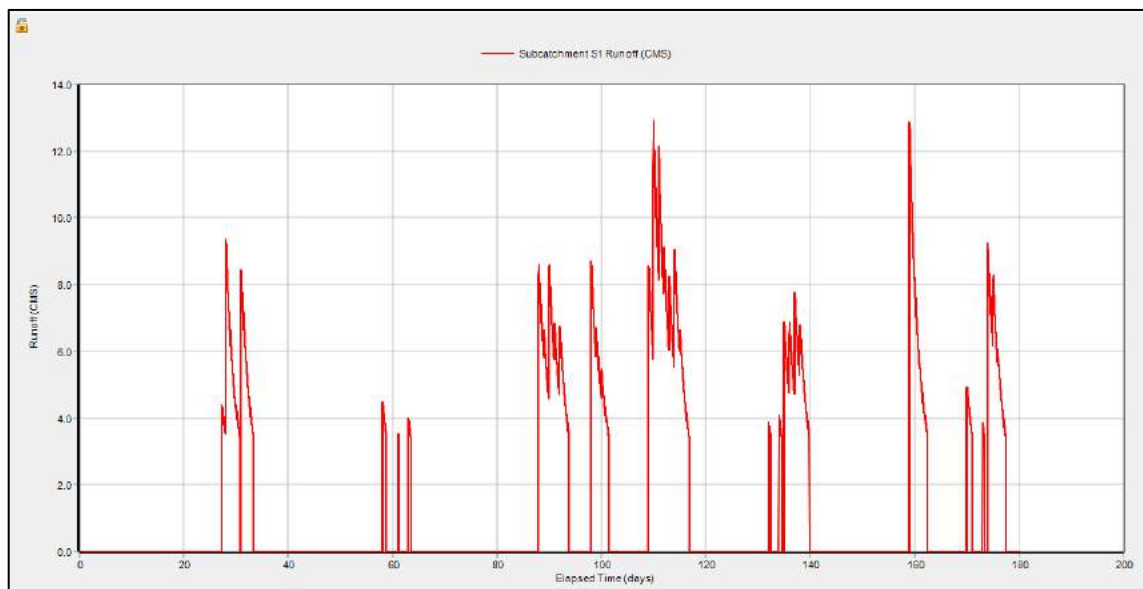
El almacenamiento final en la microcuenca tuvo 1657630 m<sup>3</sup> correspondiente a 3.397 mm de profundidad de agua de lluvia, que fue considerada como la cantidad de agua que permaneció en los depósitos. Finalmente, en base al registro del error de continuidad en este tercer escenario de simulación, la diferencia entre las entradas y salidas de agua en el sistema dio un valor de -0.001 %, siendo inferior a ±5% lo que se considera un error aceptable.

Topic: Subcatchment Runoff										
Click a column header to sort the column.										
Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Imperv Runoff mm	Perv Runoff mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10 <sup>6</sup> ltr	Peak Runoff CMS	Runoff Coeff
S1	149.95	0.00	0.00	76.46	74.74	0.00	70.11	34212.10	12.92	0.468

**Ilustración 85-4:** Resumen del reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 2.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

**Serie de tiempo de la variable escorrentía con alternativa LID (cuenca de biorretención) en CMS (m<sup>3</sup>/s)**



**Ilustración 86-4:** Serie de tiempo de la variable escorrentía en CMS (m<sup>3</sup>/s), aplicando la alternativa sostenible 2.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.



Los resultados reflejados de la serie de tiempo para el tercer escenario correspondiente a la alternativa sostenible 2 (cuenca de biorretención), fueron obtenidos a través de la opción Time Series Plot, incorporada en el Software SWMM 5.2.1, el cual permitió analizar el comportamiento de la escorrentía superficial expresada en CMS ( $m^3/s$ ) en la microcuenca del río Chibunga correspondiente al primer semestre (expresado en días) del presente año, en donde se demostró que en el mes de enero el valor más alto de escorrentía registrado fue de  $9.75 m^3/s$ , el mes de febrero tuvo  $8.50 m^3/s$  como el mayor valor de escorrentía superficial, consecutivamente en el mes de marzo el pico más alto alcanzado fue de  $8.58 m^3/s$ , seguido del mes de abril donde el valor más alto de escorrentía fue de  $13 m^3/s$ , para el mes de mayo el valor máximo llegó a  $7.80 m^3/s$  y finalmente para el mes de junio el pico más alto alcanzado de escorrentía fue de  $13 m^3/s$  respectivamente.

#### 4.8.2.4. Escenario de simulación aplicando la alternativa sostenible 3 (pavimento permeable)

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.2 (Build 5.2.1)		
*****		
Analysis Options		
*****		
Flow Units .....	CMS	
Process Models:		
Rainfall/Runoff .....	YES	
RDII .....	NO	
Snowmelt .....	NO	
Groundwater .....	NO	
Flow Routing .....	YES	
Ponding Allowed .....	NO	
Water Quality .....	NO	
Infiltration Method .....	HORTON	
Flow Routing Method .....	STEADY	
Starting Date .....	01/01/2022 01:00:00	
Ending Date .....	06/30/2022 01:00:00	
Antecedent Dry Days .....	0.0	
Report Time Step .....	00:15:00	
Wet Time Step .....	00:05:00	
Dry Time Step .....	01:00:00	
Routing Time Step .....	20.00 sec	
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Initial LID Storage .....	0.220	0.004
Total Precipitation .....	7317.560	149.950
Evaporation Loss .....	0.000	0.000
Infiltration Loss .....	4237.807	86.840
Surface Runoff .....	2696.268	55.251
Final Storage .....	160.816	3.295
Continuity Error (%) .....	3.046	

**Ilustración 87-4:** Reporte de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 3.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

La alternativa sostenible 3 denominada pavimentos permeables, se llevó a cabo una vez establecido e ingresado todos los parámetros definidos con los que trabajó el Software SWMM 5.2.1. Los modelos procesados dentro del programa fueron Runoff (escorrentía), Flow Routing (enrutamiento de flujo), método de infiltración que fue por el de Horton, y método de enrutamiento de flujo que fue el de Steady. La fecha de inicio y fin considerada para la modelación fue del 1 de enero al 30 de junio del año en curso y el informe de paso del tiempo reflejado para la simulación fue cada 15 minutos. En lo que refiere al reporte de continuidad de la cantidad de escorrentía se obtuvo que en este cuarto escenario de simulación aplicando la alternativa sostenible 3 denominada pavimentos permeables, la precipitación total registrada para este intervalo de tiempo fue de 7317.560 hectare-m equivalente a 73175600 m<sup>3</sup>, es decir 149.950 mm de profundidad de lluvia en toda la microcuenca durante un evento de 30 minutos. El almacenamiento LID inicial tuvo un valor de 2200 m<sup>3</sup> equivalente a 0.004 mm de profundidad de agua de lluvia.

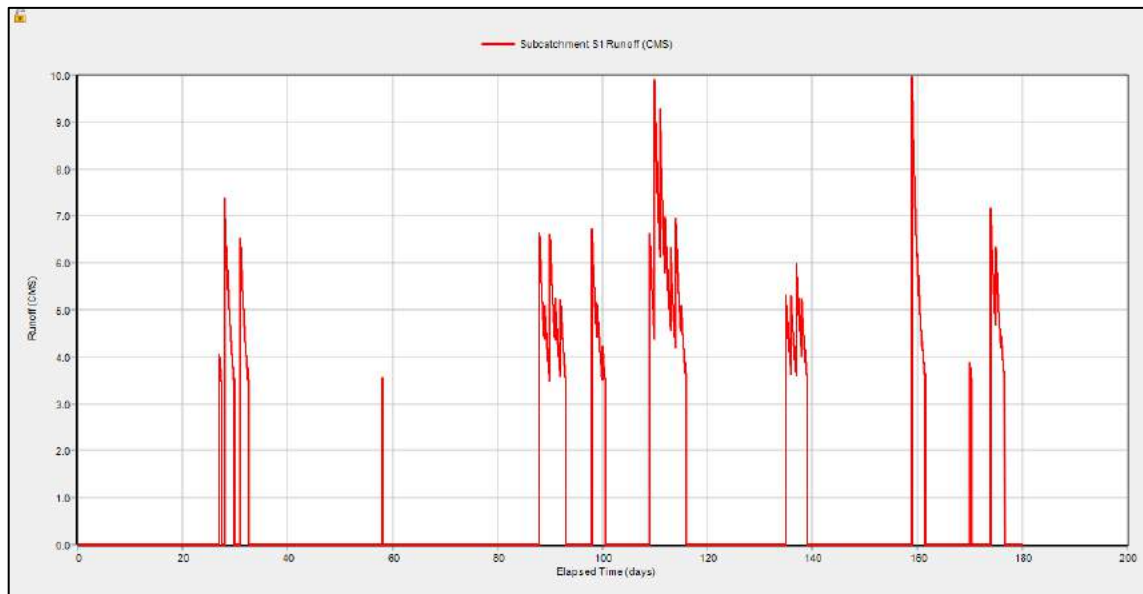
El total registrado para pérdidas de infiltración fue de 42378070 m<sup>3</sup> equivalente a 86.840 mm de profundidad de agua de lluvia infiltrada en las zonas permeables. La escorrentía superficial registrada por su parte, fue de 26962680 m<sup>3</sup> equivalente a 55.251 mm de profundidad de lluvia en zonas impermeables. El almacenamiento final en la microcuenca tuvo 1608160 m<sup>3</sup> correspondiente a 3.295 mm de profundidad de agua de lluvia, que fue considerada como la cantidad de agua que permaneció en los depósitos. Finalmente, en base al registro del error de continuidad en este cuarto escenario de simulación, la diferencia entre las entradas y salidas de agua en el sistema dio un valor de 3.046 %, siendo inferior a ±5% lo que se considera un error aceptable.

Topic: Subcatchment Runoff										
Click a column header to sort the column.										
Subcatchment	Total Precip mm	Total Runon mm	Total Evap mm	Total Infil mm	Imperv Runoff mm	Perv Runoff mm	Total Runoff mm	Total Runoff 10^6 ltr	Peak Runoff CMS	Runoff Coeff
S1	149.95	0.00	0.00	86.84	74.66	0.00	55.25	26962.84	9.95	0.368

**Ilustración 88-4:** Resumen del reporte de continuidad de escorrentía obtenido del Software aplicando la alternativa sostenible 3.

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

### Serie de tiempo de la variable escorrentía con alternativa LID (pavimento permeable) en CMS ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

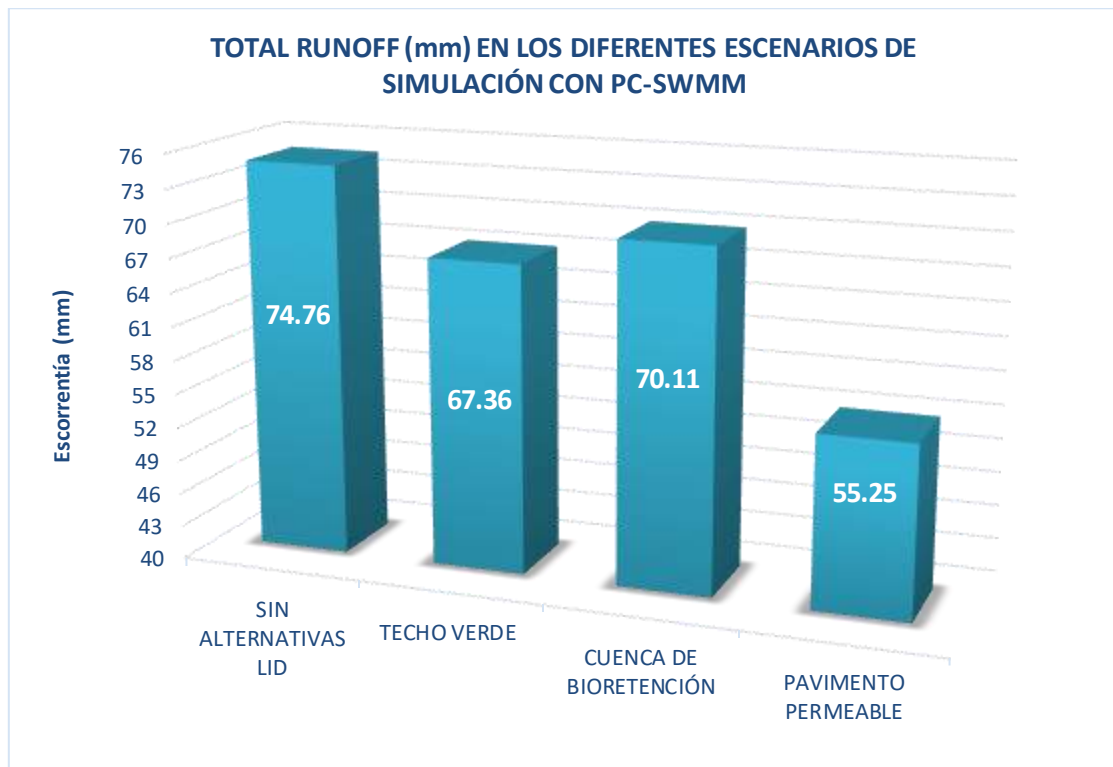


**Ilustración 89-4:** Serie de Tiempo de la variable escorrentía en CMS ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), aplicando la alternativa sostenible 3.

**Realizado por:** Naranjo, Joel, 2022.

Los resultados reflejados de la serie de tiempo para el cuarto escenario correspondiente a la alternativa sostenible 3 (pavimento permeable) fueron obtenidos a través de la opción Time Series Plot, incorporada en el Software SWMM 5.2.1, el cual permitió analizar el comportamiento de la escorrentía superficial expresada en CMS ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) en la microcuenca del río Chibunga correspondiente al primer semestre (expresado en días) del presente año, en donde se demostró que en el mes de enero el valor más alto de escorrentía registrado fue de  $7.48 \text{ m}^3/\text{s}$ , el mes de febrero tuvo  $6.50 \text{ m}^3/\text{s}$  como el mayor valor de escorrentía superficial, consecutivamente en el mes de marzo el pico más alto alcanzado fue de  $6.65 \text{ m}^3/\text{s}$ , seguido del mes de abril donde el valor más alto de escorrentía fue de  $9.95 \text{ m}^3/\text{s}$ , para el mes de mayo el valor máximo llegó a  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  y finalmente para el mes de junio el pico más alto alcanzado de escorrentía fue de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente.

#### 4.9. Análisis comparativo de los escenarios de simulación.



**Ilustración 90-4:** Análisis comparativo de los escenarios de simulación mediante SWMM

5.2.1.

Realizado por: Naranjo, Joel, 2022.

Para comparar la escorrentía superficial total producida por cada uno de los escenarios de simulación evaluados, se utilizó el reporte de continuidad de escorrentía obtenido a través de la opción Subcatchment Runoff, incorporada en el Software SWMM 5.2.1, el cual permitió analizar el comportamiento de la escorrentía superficial (Total Runoff) expresada en mm, en relación a los 4 escenarios de simulación que fueron: escenario sin la incorporación de alternativas sostenibles LID, alternativa sostenible 1 (techo verde), alternativa sostenible 2 (cuenca de biorretención) y alternativa sostenible 3 (pavimento permeable).

Para el primer caso, el escenario sin la incorporación de alternativas sostenibles LID, obtuvo un valor total de escorrentía superficial de 74.76 mm, este primer escenario funcionó como base para poder establecer una comparativa con las demás alternativas sostenibles que se han incorporado mediante la modelación con el software SWMM.

En el caso de la Alternativa sostenible 1 denominada como techos verdes, el valor registrado de escorrentía superficial total fue de 67.36 mm en el periodo de tiempo establecido, mientras que la Alternativa sostenible 2 (cuenca de biorretención) logró alcanzar una escorrentía superficial total mayor a la alternativa sostenible 1, con un valor de 70.11 mm respectivamente, sin embargo, hubo

un cambio significativo para el caso de la alternativa 3 (pavimento permeable), en donde este escenario de simulación alcanzó un valor total de esorrentía superficial de 55.25mm siendo ésta considerada como la mejor alternativa sostenible para reducir la esorrentía pluvial en comparativa a las 2 alternativas sostenibles anteriores convirtiéndose, así como el mejor escenario de simulación en estudio implementado en la microcuenca del río Chibunga mediante el uso de herramientas otorgadas por el Software SWMM versión 5.2.1.

## CONCLUSIONES

- Se fundamentó teórica y conceptualmente mediante la recopilación y análisis de fuentes de información primaria, las diferentes tecnologías de diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (LIDS) que estuvieron clasificadas como medidas estructurales y no estructurales, en donde para la presente investigación fueron estudiadas y analizadas 3 alternativas sostenibles correspondientes a las medidas estructurales, entre ellas fueron: pavimentos permeables, techos verdes y celdas de biorretención. Estas técnicas de manejo sostenible disponen de un enfoque de diseño de ingeniería que tienen relevancia tanto práctica como ambiental porque representan una propuesta que permite encontrar soluciones a los problemas relacionados a los procesos de escorrentía superficial en la zona y a su vez contribuye a la conservación y optimización de los recursos naturales mediante la recuperación de zonas permeables. Estas tecnologías engloban soluciones innovadoras, prácticas y ecológicas que permiten el aumento de la sostenibilidad ambiental, ofreciendo una proyección social de mejoramiento para la preservación del medio ambiente y que a futuro puede ser empleada en otras regiones del país.
- Para alcanzar los resultados óptimos en el trabajo investigativo fue importante definir los parámetros de entrada necesarios para el modelado de los diferentes escenarios LID, entre los cuales fueron: parámetros hidrológicos, hidrográficos, geológicos, geomorfológicos, en donde se emplearon herramientas geoespaciales, como el análisis espacial, análisis espacial en 3D, hidrología, pendientes y drenaje en una base de datos SIG, que permitió comprender la influencia de la forma, relieve y sistema de drenaje en la unidad hidrográfica. Se identificaron también los diferentes tipos de uso del suelo mediante la categorización y análisis de mapas temáticos de los años 2001 y 2016 correspondientes a la microcuenca del río Chibunga. Fue fundamental el análisis de las variables hidrológicas que fueron obtenidas de la estación meteorológica de la ESPOCH-INAMHI (M1036), en donde se obtuvieron valores medios y mensuales para la evaporación y precipitación, así como la temperatura (media, mínima y máxima). El análisis y determinación de estos parámetros fue clave para el modelado de las alternativas sostenibles (LID) mediante la aplicación del Software SWMM 5.2.1.
- Se evaluó el comportamiento de la microcuenca del río Chibunga a través de la simulación de 4 escenarios LID, aplicando las herramientas proporcionadas por el software SWMM V 5.2.1, desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA), que cuenta con el respaldo de varias instituciones a nivel internacional (organismos estatales, universidades y empresas). Esta herramienta permitió el modelamiento dinámico de simulación y análisis de la hidrología urbana, en donde fue posible evaluar el comportamiento de la escorrentía superficial (Total

Runoff) expresada en mm, en relación a 4 escenarios de simulación que fueron: escenario sin la incorporación de alternativas sostenibles LID, alternativa sostenible 1 (techos verdes), alternativa sostenible 2 (cuencas de biorretención) y alternativa sostenible 3 (pavimentos permeables). Estos LIDS fueron seleccionados teniendo en cuenta los objetivos planteados para la recuperación natural del ciclo hidrológico, en la microcuenca del río Chibunga. Se demostró que para el primer escenario sin la incorporación de alternativas LID, se obtuvo un valor de escorrentía superficial de 74.76 mm. En el caso de la alternativa sostenible 1, el valor registrado de escorrentía superficial total alcanzó los 67.36 mm, el cual fue considerado como el segundo mejor escenario de simulación; para el caso de la alternativa sostenible 2, el valor total registrado fue de 70.11 mm. Por último, para la alternativa 3 se registró un valor total de escorrentía de 55.25 mm siendo ésta, considerada como la mejor alternativa sostenible para reducir la escorrentía pluvial en comparativa con las 2 alternativas sostenibles anteriores, convirtiéndose así, como el mejor escenario de simulación en estudio implementado en la microcuenca del río Chibunga mediante el uso de herramientas otorgadas por el Software SWMM versión 5.2.1.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso y aprovechamiento del software SWMM V5.2.1 para proyectos de drenaje urbano sostenible, dado que proporciona todas las capacidades computacionales hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua, al tiempo que ofrece una gran cantidad de herramientas adicionales para facilitar el desarrollo de modelos, parametrización, y el análisis de escenarios LID.
- Impulsar el desarrollo investigativo en esta área para el desarrollo de proyectos urbanos sostenibles, puesto que existe limitada información en el manejo de estas tecnologías, lo que dificulta la toma de decisiones para investigaciones futuras relacionadas al diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).
- Una vez obtenido los resultados de los escenarios de simulación LID del presente proyecto de investigación, se recomienda realizar estudios geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos para implementar un diseño estructural de pavimentos permeables que se ajuste a los criterios técnicos del sitio en estudio.
- Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son técnicas que minimizan el volumen de agua de escorrentía provocado por la impermeabilización del suelo debido a la urbanización. Por esta razón, se recomienda considerar su aplicación en áreas urbanas de nuestra localidad, para disminuir el volumen de agua de escorrentía superficial total y controlar las posibles inundaciones.
- La aplicación de las técnicas LID se recomienda implementarla conjuntamente con el diseño urbano integrado y planeamiento urbanístico, garantizando que estas tecnologías se ejecuten de manera integral y organizada de forma que contribuyan al paisajismo, a la calidad del agua y al control del volumen de escorrentía superficial total.



## GLOSARIO

**Área de drenaje:** Es el espacio llano entre su división topográfica (proyección horizontal) (Ordoñez, 2011, p.11).

**Balance hidrológico:** Relaciona los elementos del ciclo hidrológico: la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía superficial, el almacenamiento en el suelo y en los espacios subterráneos y el flujo de aguas subterráneas (Carson et al., 2017, p.67).

**Ciclo hidrológico:** Los acontecimientos que hacen que el agua pase de la superficie terrestre a la atmósfera en fase de vapor antes de regresar en forma líquida y sólida (Hou et al., 2022, p.83).

**Coefficiente de escorrentía:** Se describe como la relación entre la precipitación total y la precipitación que se convierte en escorrentía superficial (García et al., 2021, p.120).

**Coefficiente de variación:** La relación entre la desviación estándar y la media es lo que la determina (Bevilacqua y Arcuri, 2020, p.31).

**Condensación:** La transformación del agua de vapor a líquido (Burbano y Pasquel, 2015, p.145).

**Cuenca hidrográfica:** Una cuenca hidrográfica es una región definida topográficamente que es drenada por uno o más cursos de agua vinculados, con el objetivo de descargar todo el flujo de efluentes a través de una única salida (Fan et al., 2019, p.211).

**Escorrentía:** Una parte de las precipitaciones que escurre por la superficie de la tierra o se acumula bajo ella (Yamanee-Nolin y Larson, 2019, p.44).

**Evaporación de agua:** Liberación de vapor de agua de una superficie libre a una temperatura inferior al punto de ebullición (González y Ramírez, 2017, p.19).

**Evapotranspiración:** Volumen de agua que las plantas y la evaporación transfieren conjuntamente del suelo a la atmósfera (Hou et al., 2022, p.83).

**Infiltración:** Cuando todas las fuerzas que actúan sobre las partículas del suelo tienen un componente vertical en sentido de la gravedad, el resultado es la formación de un conducto de paso de agua a través de materiales naturales o artificiales (Houdeshel et al., 2015, p.49).

**Intensidad:** Es la velocidad de caída del agua expresada en milímetros por hora (Simpson y Tirpak, 2021, p.135).

**Intercepción:** El proceso por el cual la precipitación es detenida y retenida por los edificios y las plantas, impidiendo que se evapore y transpire antes de que pueda llegar al suelo (Gimenez y Breuste, 2020, p.70).

**Periodo de retorno:** El número medio de años que transcurren entre dos sucesos de una magnitud determinada o superior se conoce como intervalo de recurrencia (T). Se considera que la probabilidad del m-ésimo suceso en los (n) registros es inversamente proporcional a este periodo de tiempo (Ponnada et al., 2020, p.88).

**Precipitación:** Agregado de partículas acuosas, sólidas, líquidas, cristalizadas o amorfas que se originan en una nube o grupo de nubes y caen al suelo (Houdeshel et al., 2015, p.49).

**Tiempo de concentración:** El tiempo de concentración de la cuenca, o la cantidad de tiempo que tarda una partícula de agua en viajar desde el punto más lejano hasta el punto de drenaje, es un parámetro muy utilizado en los cálculos de la relación lluvia-escorrentía (Skala et al., 2020, p.81).

## BIBLIOGRAFÍA

**AKTER, A., TANIM, A.H. y ISLAM, M.K.** Possibilities of urban flood reduction through distributed-scale rainwater harvesting. *Water Science and Engineering* [en línea], 2020, vol. 13, no. 2, pp. 95-105. ISSN 24058106. DOI 10.1016/j.wse.2020.06.001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.06.001>.

**ARIZA, S.L.J., MARTÍNEZ, J.A., MUÑOZ, A.F., QUIJANO, J.P., RODRÍGUEZ, J.P., CAMACHO, L.A. y DÍAZ-GRANADOS, M.** A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability*, 2019, (Switzerland) vol. 11, no. 8. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su11082312.

**BACH, P.M., MCCARTHY, D.T., URICH, C., SITZENFREI, R., KLEIDORFER, M., RAUCH, W. y DELETIC, A.** A planning algorithm for quantifying decentralised water management opportunities in urban environments. *Water Science and Technology*, 2013, vol. 68, no. 8, pp. 1857-1865. ISSN 02731223. DOI 10.2166/wst.2013.437.

**BACH, P.M., RAUCH, W., MIKKELSEN, P.S., MCCARTHY, D.T. y DELETIC, A.** A critical review of integrated urban water modelling - Urban drainage and beyond. *Environmental Modelling and Software* [en línea], 2014, vol. 54, pp. 88-107. ISSN 13648152. DOI 10.1016/j.envsoft.2013.12.018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.018>.

**BARREZUETA, M.** Propuesta de diseño de firmes permeables para calles urbanas en la Ciudad de Machala. [en línea], 2019, pp. 1-170. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15069>.

**BERGESON, C.B., MARTIN, K.L., DOLL, B. y CUTTS, B.B.** Soil infiltration rates are underestimated by models in an urban watershed in central North Carolina, USA. *Journal of Environmental Management* [en línea], 2022, vol. 313, pp. 115004. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2022.115004. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115004>.

**BEVILACQUA, P., BRUNO, R. y ARCURI, N.** Green roofs in a Mediterranean climate: energy performances based on in-situ experimental data. *Renewable Energy* [en línea], 2020, vol. 152, pp. 1414-1430. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2020.01.085. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.085>.

**BLOORCHIAN, A.A., AHIABLAME, L., OSOULI, A. y ZHOU, J.** Modeling BMP and Vegetative Cover Performance for Highway Stormwater Runoff Reduction. *Procedia Engineering* [en línea], 2016, vol. 145, pp. 274-280. ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2016.04.074. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.074>.

**BURBANO, A. y PASQUEL, E.** Introducción a la Hidrogeología del Ecuador. *Green Environment*, 2015, vol. 151, pp. 10-17.

**CÁRDENAS, E., RODRÍGUEZ, Á. y JARAMILLO, J.** Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua. *CIENCIA ergo sum*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 173-180. ISSN 14050269. DOI 10.30878/ces.v24n2a9.

**CARSON, T., KEELEY, M., MARASCO, D.E., MCGILLIS, W. y CULLIGAN, P.** Assessing methods for predicting green roof rainfall capture: A comparison between full-scale observations and four hydrologic models. *Urban Water Journal* [en línea], 2017, vol. 14, no. 6, pp. 589-603. ISSN 17449006. DOI 10.1080/1573062X.2015.1056742. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2015.1056742>.

**CONLEY, G., BECK, N., RIIHIMAKI, C.A. y TANNER, M.** Quantifying clogging patterns of infiltration systems to improve urban stormwater pollution reduction estimates. *Water Research X* [en línea], 2020, vol. 7, pp. 100049. ISSN 25899147. DOI 10.1016/j.wroa.2020.100049. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100049>.

**CZEMIEL BERNDTSSON, J.** Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering* [en línea], 2010, vol. 36, no. 4, pp. 351-360. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2009.12.014. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>.

**FAN, G., LI, Z., WANG, S., HUANG, K. y LUO, J.** Migration and transformation of nitrogen in bioretention system during rainfall runoff. *Chemosphere* [en línea], 2019, vol. 232, pp. 54-62. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.05.177. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.177>.

**FAROOQ, Q.U. y ALLUQMANI, A.E.** Application of soil based low impact development system for Flash Flood management of Jeddah, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* [en línea], 2021. ISSN 10183639. DOI 10.1016/j.jksues.2021.09.006.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.09.006>.

**GARCÍA, L., PERALES, S., RICO, M., ANDRÉS, I. y MARCO, J.B.** *Guía básica para el diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la ciudad de València* [en línea], 2021, S.L.: s.n. ISBN 9788490893869. Disponible en: [https://ciclointegraldelagua.com/files/normativa/Guia\\_Basica\\_para\\_el\\_Disenio\\_de\\_Sistemas\\_Urbanos\\_de\\_Drenaje\\_Sostenible\\_en\\_la\\_Ciudad\\_de\\_Valencia\\_V01.pdf](https://ciclointegraldelagua.com/files/normativa/Guia_Basica_para_el_Disenio_de_Sistemas_Urbanos_de_Drenaje_Sostenible_en_la_Ciudad_de_Valencia_V01.pdf).

**GIMENEZ, L. y BREUSTE, A.** Sustainable Drainage Systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2020.

**GONZÁLEZ, S. y RAMÍREZ, A.** AGUAS PLUVIALES URBANAS EN LA PARTE ALTA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS , GUADALAJARA , JALISCO , 2017, pp. 83-104.

**HAMOUIZ, V. y MUTHANNA, T.M.** Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model. *Journal of Environmental Management* [en línea], 2019, vol. 249, no. January, pp. 109350. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2019.109350. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109350>.

**HOU, G., ZHENG, J., CUI, X., HE, F., ZHANG, Y., WANG, Y., LI, X., FAN, C. y TAN, B.** Suitable coverage and slope guided by soil and water conservation can prevent non-point source pollution diffusion: A case study of grassland. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea], 2022, vol. 241, no. June, pp. 113804. ISSN 10902414. DOI 10.1016/j.ecoenv.2022.113804. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113804>.

**HOU, J., ZHU, M., WANG, Y. y SUN, S.** Optimal spatial priority scheme of urban LID-BMPs under different investment periods. *Landscape and Urban Planning* [en línea], 2020, vol. 202, no. 539, pp. 103858. ISSN 01692046. DOI 10.1016/j.landurbplan.2020.103858. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103858>.

**HOUESHEL, C.D., HULTINE, K.R., JOHNSON, N.C. y POMEROY, C.A.** Evaluation of three vegetation treatments in bioretention gardens in a semi-arid climate. *Landscape and Urban Planning* [en línea], 2015, vol. 135, pp. 62-72. ISSN 01692046. DOI 10.1016/j.landurbplan.2014.11.008. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.008>.

**JOKSIMOVIC, D. y ALAM, Z** Cost efficiency of Low Impact Development (LID) stormwater management practices. *Procedia Engineering* [en línea], 2014, vol. 89, no. Lid, pp. 734-741. ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2014.11.501. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.501>.

**JOSHI, P., LEITÃO, J.P., MAURER, M. y BACH, P.M.** Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. *Water Research* [en línea], 2021, vol. 191, pp. 116780. ISSN 18792448. DOI 10.1016/j.watres.2020.116780. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116780>.

**KRAUSE, P., BOYLE, D.P. y BÄSE, F.** Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 2005, vol. 5, pp. 89-97. ISSN 16807359. DOI 10.5194/adgeo-5-89-2005.

**KUMAR, P., DEBELE, S.E., SAHANI, J., RAWAT, N., MARTI-CARDONA, B., ALFIERI, S.M., BASU, B., BASU, A.S., BOWYER, P., CHARIZOPOULOS, N., GALLOTTI, G., JAAKKO, J., LEO, L.S., LOUPIS, M., MENENTI, M., MICKOVSKI, S.B., MUN, S.J., GONZALEZ-OLLAURI, A., PFEIFFER, J., PILLA, F., PRÖLL, J., RUTZINGER, M., SANTO, M.A., SANNIGRAHI, S., SPYROU, C., TUOMENVIRTA, H. y ZIEHER, T.** Nature-based solutions efficiency evaluation against natural hazards: Modelling methods, advantages and limitations. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 784. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.147058.

**KWAK, D., KIM, H. y HAN, M.** Runoff Control Potential for Design Types of Low Impact Development in Small Developing Area Using XPSWMM. *Procedia Engineering* [en línea], 2016, vol. 154, pp. 1324-1332. ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2016.07.483. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.483>.

**LE FLOCH, N., PONS, V., HASSAN ABDALLA, E.M. y ALFREDSSEN, K.** Catchment scale effects of low impact development implementation scenarios at different urbanization densities. *Journal of Hydrology* [en línea], 2022, vol. 612, no. PB, pp. 128178. ISSN 00221694. DOI 10.1016/j.jhydrol.2022.128178. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128178>.

**LEGATES, G.** Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 2007, vol. 35, no. 1, pp. 1-9.

**MARTIN-MIKLE, C.J., DE BEURS, K.M., JULIAN, J.P. y MAYER, P.M.** Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. *Landscape and Urban Planning* [en línea], 2015, vol. 140, pp. 29-41. ISSN 01692046. DOI 10.1016/j.landurbplan.2015.04.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.04.002>.

**MONRABAL-MARTINEZ, C., ABERLE, J., MUTHANNA, T.M. y ORTS-ZAMORANO, M.** Hydrological benefits of filtering swales for metal removal. *Water Research* [en línea], 2018, vol. 145, pp. 509-517. ISSN 18792448. DOI 10.1016/j.watres.2018.08.051. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.051>.

**MUTHANNA, T.M., SIVERTSEN, E., KLIEWER, D. y JOTTA, L.** Coupling field observations and Geographical Information System (GIS)-based analysis for improved Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) performance. *Sustainability, 2018, (Switzerland)* vol. 10, no. 12, pp. 1-13. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su10124683.

**NKWUNONWO, U.C., WHITWORTH, M. y BAILY, B.** A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African* [en línea], 2020, vol. 7, pp. e00269. ISSN 24682276. DOI 10.1016/j.sciaf.2020.e00269. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>.

**ORDOÑEZ, J.** Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. [en línea], 2011. Disponible en: [http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-%0Asam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrologico.pdf%0A](http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-%0Asam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf%0A).

**PENG, Z. y STOVIN, V.** Independent Validation of the SWMM Green Roof Module. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, vol. 22, no. 9, pp. 1-12. ISSN 1084-0699. DOI 10.1061/(asce)he.1943-5584.0001558.

**PÉREZ, G., CHOCARRO, C., JUÁREZ, A. y COMA, J.** Evaluation of the development of five Sedum species on extensive green roofs in a continental Mediterranean climate. *Urban Forestry and Urban Greening* [en línea], 2020, vol. 48, no. July 2019, pp. 126566. ISSN 16108167. DOI 10.1016/j.ufug.2019.126566. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126566>.

**PONNADA, E. V., LYNN, T.J., ERGAS, S.J. y MIHELICIC, J.R.** Long-term field performance of a conventional and modified bioretention system for removing dissolved nitrogen

species in stormwater runoff. *Water Research* [en línea], 2020, vol. 170, pp. 115336. ISSN 18792448. DOI 10.1016/j.watres.2019.115336. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115336>.

**ROBLERO, J.U.A., BRAVO, J.R.S., ACEVEDO, A.D., DE LA CRUZ, C.L. y VILLA, O.R.M.** Validation of a prototype of rainwater harvesting system for domestic use and human consumption. *Idesia*, 2019, vol. 37, no. 1, pp. 53-59. ISSN 07183429. DOI 10.4067/S0718-34292019005000302.

**ROSSMAN, L.** Storm Water Management Model (SWMM) User ' s Manual Version 5 .2.1. *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*, 2015, pp. 1-353.

**SHAFIQUE, M., XUE, X. y LUO, X.** An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening* [en línea], 2020, vol. 47, pp. 126515. ISSN 16108167. DOI 10.1016/j.ufug.2019.126515. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126515>.

**SIMPSON, I.M., WINSTON, R.J. y TIRPAK, R.A.** Assessing maintenance techniques and in-situ pavement conditions to restore hydraulic function of permeable interlocking concrete pavements. *Journal of Environmental Management* [en línea], 2021, vol. 294, no. 8, pp. 112990. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2021.112990. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112990>.

**SIN, J., JUN, C., ZHU, J.H. y YOO, C.** Evaluation of flood runoff reduction effect of LID (Low Impact Development) based on the decrease in CN: Case studies from Gimcheon Pyeonghwa district, Korea. *Procedia Engineering* [en línea], 2014, vol. 70, pp. 1531-1538. ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2014.02.169. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.169>.

**SKALA, V., DOHNAL, M., VOTRUBOVA, J., VOGEL, T., DUSEK, J., SACHA, J. y JELINKOVA, V.** Hydrological and thermal regime of a thin green roof system evaluated by physically-based model. *Urban Forestry and Urban Greening* [en línea], 2020, vol. 48, no. July 2019, pp. 126582. ISSN 16108167. DOI 10.1016/j.ufug.2020.126582. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126582>.

**SUN, Y.W., LI, Q.Y., LIU, L., XU, C.D. y LIU, Z.P.** Hydrological simulation approaches for BMPs and LID practices in highly urbanized area and development of hydrological performance



indicator system. *Water Science and Engineering* [en línea], 2014, vol. 7, no. 2, pp. 143-154. ISSN 16742370. DOI 10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.003>.

**US EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** Guidance Manual for Developing Best Management Practices (BMP). *Epa 833-B-93-004* [en línea], 1993, pp. 1-201. Disponible en: <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/owm0274.pdf>.

**WANNIARACHCHI, S.S. y WIJESEKERA, N.T.S.** Challenges in field approximations of regional scale hydrology. *Journal of Hydrology: Regional Studies* [en línea], 2020, vol. 27, no. July 2019, pp. 100647. ISSN 22145818. DOI 10.1016/j.ejrh.2019.100647. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100647>.

**WRIGHT, M.S.P., SANTELMANN, M. V., VACHÉ, K.B. y HULSE, D.W.** Modeling the impact of development policies and climate on suburban watershed hydrology near Portland, Oregon. *Landscape and Urban Planning*, 2021, vol. 214. ISSN 01692046. DOI 10.1016/j.landurbplan.2021.104133.

**XING, W., LI, P., CAO, S. bing, GAN, L. li, LIU, F. lin y ZUO, J. e.** Layout effects and optimization of runoff storage and filtration facilities based on SWMM simulation in a demonstration area. *Water Science and Engineering* [en línea], 2016, vol. 9, no. 2, pp. 115-124. ISSN 16742370. DOI 10.1016/j.wse.2016.06.007. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wse.2016.06.007>.

**YAMANEE-NOLIN, M. y LARSON, M.** A physically based model for mesoscale SuDS – an alternative to large-scale urban drainage simulations. *Journal of Environmental Management* [en línea], 2019, vol. 240, pp. 527-536. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2019.03.037. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.037>.

**YANG, W., BRÜGGEMANN, K., SEGUYA, K.D., AHMED, E., KAESEBERG, T., DAI, H., HUA, P., ZHANG, J. y KREBS, P.** Measuring performance of low impact development practices for the surface runoff management. *Environmental Science and Ecotechnology* [en línea], 2020, vol. 1, no. December 2019, pp. 100010. ISSN 26664984. DOI 10.1016/j.ese.2020.100010. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100010>.

**YIN, D., EVANS, B., WANG, Q., CHEN, Z., JIA, H., CHEN, A.S., FU, G., AHMAD, S. y LENG, L.** Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact

development facilities on community scale. *Science of the Total Environment* [en línea], 2020, vol. 720, pp. 137630. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.137630. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137630>.

**YUAN, D., AN, Y., WANG, J., CHU, S., LIM, B., CHEN, B., XIONG, Y., KOU, Y. y LI, J.** Dissolved organic matter characteristics of urban stormwater runoff from different functional regions during grassy swale treatment. *Ecological Indicators* [en línea], 2019, vol. 107, no. July, pp. 105667. ISSN 1470160X. DOI 10.1016/j.ecolind.2019.105667. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105667>.

**ZHU, H., YU, M., ZHU, J., LU, H. y CAO, R.** Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. *International Journal of Transportation Science and Technology* [en línea], 2019, vol. 8, no. 4, pp. 373-382. ISSN 20460449. DOI 10.1016/j.ijtst.2018.12.001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.12.001>.



## ANEXOS

### ANEXO A: MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, ENERO (2022)

FECHA	TEMPERATURA °C			HUMEDAD RELATIVA %			TENSIÓN VAPOR	PUNTO ROCIO	PRECIP	EVAPORAC.	HELIOFANÍA		VIENTO		PRESIÓN ATM.
	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	mlb	°C	(mm H2O)	mm	Horas	%	Dirección	Velocidad	mmhg
1	15,4	23,8	10,5	66,5	96	31	11,8	9,5	0	1,4	9,1	76	SE	2	543,4
2	14,5	21,5	10,3	66,6	94	33	11,4	8,9	0	3,9	4,1	34	SE	1,6	543,7
3	14,5	23,5	8,9	53,5	92	20	9,6	6,3	0	6,6	10,1	84	NE-SE	3,2	543,7
4	13,8	24,5	3	57,4	84	23	9,1	5,3	0	6	10,3	86	SE	1	543,4
5	14,5	23,2	10,2	70,8	95	32	12	9,7	3,2	7	9,3	78	NE-SE	1,5	542,4
6	13,6	22	7,8	67,5	96	33	10,8	8,1	0	5,9	9,3	78	SE	1,3	543,5
7	13,3	23	5,5	59,8	96	24	9,5	6,2	0	6,2	10,3	86	SE	2,4	543,5
8	12,7	23,3	2,9	59,4	89	26	8,9	5	0	5,7	10,4	87	SE	1,2	544
9	13,6	24,2	5,6	63,7	95	23	9,4	6	0	5,4	7,6	63	SE	1,8	543,7
10	13,9	20	8,4	57,2	91	39	10,3	7,4	0	3,3	3,2	27	SE	1,4	543,7
11	15	24	8,1	54,8	79	26	10,1	7	0,2	5,7	7,7	64	SE	1,5	543,5
12	15	22,8	10,1	66,8	94	31	11,1	8,4	0	6,9	6,8	57	SE	1,5	543,9
13	15,1	23,3	10,7	68,7	94	29	11,3	8,7	1,2	6,8	7,1	59	NE-SE	2	543,8
14	14,4	21,5	10	68	97	36	11,1	8,6	0	5,7	5,2	43	SE	2,5	544,1
15	13	21,7	10	72,2	95	32	10,7	7,9	4,3	4,9	4	33	SE	2,6	544,4
20	13	20,5	8,4	73,6	94	45	11,5	9	0	3	1,2	10	SE	1	544,1
21	14,1	21,5	9,4	71	96	34	11,6	9,2	0,9	5,7	5	42	SE	2,2	543,8
22	14,3	22	10,4	73,6	96	39	12,2	9,8	0	4	5,1	43	SE	2	543,5
23	14,9	23,8	8	64,8	96	27	10,5	7,7	0	6,5	10,6	88	SE	2,4	542,6
24	15,7	24,7	10,4	67,8	96	27	11,4	8,9	0	6,8	8,9	74	SE	2,4	542,1
25	14,5	23,4	11	75,1	94	33	12,8	10,5	0,6	3,4	2,6	22	SE	1	543,5
26	14,9	24	10,3	72,2	98	28	11,9	9,5	0	5,4	4,4	37	SE	1,5	544,2
27	13,8	24,2	10,9	75,4	97	34	11,7	9,3	13,5	5,2	3,5	29	SE-SW	1,3	544,1
28	13,2	22,7	9,3	80,8	98	35	12,3	10	10,3	5,4	5,3	44	SW	1,2	543,9
29	14,6	23,4	7,9	64,6	97	32	11,4	8,8	0	6,9	6	50	SE-SW	1,8	542,7
30	13,3	18	9,8	78,9	94	55	12,2	9,9	0,3	2,2	0	0	SE	1	543,7
31	13	18,8	9,5	83	97	43	12,5	10,3	9,8	1,8	0	0	SE	0,8	543,5
<b>SUMA</b>	<b>434,8</b>	<b>693,1</b>	<b>260,3</b>	<b>2107,5</b>	<b>2923</b>	<b>1009</b>	<b>340,6</b>	<b>257</b>	<b>44,3</b>	<b>156,2</b>	<b>191,9</b>	<b>1599,2</b>	<b>SE</b>	<b>55,6</b>	<b>16853</b>
<b>MEDIA</b>	<b>14</b>	<b>22,4</b>	<b>8,4</b>	<b>68</b>	<b>94,3</b>	<b>32,5</b>	<b>11</b>	<b>8,3</b>		<b>5</b>	<b>6,2</b>	<b>51,6</b>		<b>1,8</b>	<b>543,6</b>

**ANEXO B: MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, FEBRERO (2022)**

FECHA	TEMPERATURA °C			H. RELATIVA %			TENSIÓN VAPOR	PUNTO ROCÍO	PRECIP.	EVAPORA.	HELIOFANÍA		VIENTO		PRESIÓ NATM.
	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	mlb	°C	mm H <sub>2</sub> O	mm	Horas	%	Dirección	Veloc.	mm Hg
1	13	20	7,4	78,4	98	43	11,9	9,5	0	4,8	4,8	40	SE	1,5	543,4
2	13,3	21	8,6	70,3	96	32	11,2	8,7	0	6,1	8	67	SE	1,8	543,6
3	13,7	21,6	6,6	65,4	94	30	10,9	8,1	0	5,5	9,7	81	SE	2,3	543,7
4	15,2	23,2	7,3	67,3	95	26	11,5	9	0	6,5	9,1	76	SE	2	543,4
5	14,4	23	10,2	70,5	95	31	11,3	8,8	0	5,6	6,4	53	SE	2,8	543,2
6	13,2	18,6	10,5	79,1	97	51	12,1	9,8	0	3,8	3,4	28	SE	1,4	543,1
7	12,9	17,5	9	75,9	97	42	11,5	9,1	0,5	1,6	0,5	4	SE	1,6	544,2
8	13,2	21,2	9,6	75,1	97	40	12	9,7	0	4,4	2,6	22	SE	1	544,1
9	12,8	19,6	6,7	74,4	95	39	11,2	8,6	0	3,3	1,2	10	SE	1,5	543,8
10	14,5	22	9,2	67,5	97	33	11,4	8,9	0	6,9	7,8	65	SE	1,8	543,1
11	15	22,5	10	68,8	94	29	11,3	8,8	0,9	4,4	3,6	30	SE	2	542,2
12	14,5	23,2	10,3	72,5	97	30	12	9,7	0	5,5	6	50	SE	2,4	542,6
13	14	19,6	10	73,3	96	40	11,6	9,2	0	4,7	0,7	6	SE	1,4	543,1
14	15,1	24,7	9,5	66,4	95	21	11	8,4	0	5,2	6,9	58	SE	2,4	542,8
15	14,6	21,4	10,3	69,5	95	33	11,6	9,2	0	4,7	3,9	33	SE	2,3	543,5
16	14,1	21,8	9,2	71,2	94	32	11,3	8,8	0	5,5	4,4	37	SE	2,5	544,3
17	15,1	23,4	9,6	67,4	96	29	11,6	9,2	0	6,1	6,7	56	SE	1,8	543,8
18	14,9	24,1	10,9	74,5	95	33	12,5	10,3	0	4,5	6	50	SE	2,6	542,5
19	14,5	23,2	9,5	73	97	33	11,8	9,4	0	4,7	2,8	23	SE	1	542,7
20	14,6	23	7,9	63,7	97	27	10,2	7,2	0	5	5,5	46	SE	1,2	542,2
21	14,2	24,1	6,2	68,8	94	29	10	6,8	0	4,8	10	83	SE	1,8	542,5
22	14,4	24	7,2	72,5	97	30	10,8	8	0	6,2	6,2	52	SE	2	543,1
23	14,9	23,8	8,8	73,3	96	40	11,3	8,8	5,3	6,2	7,1	59	SE	2	542,8
24	14	19,2	10,9	66,4	95	21	12,5	10,2	0,3	2,9	1,6	13	SE	1,5	543,6
25	14,9	23	10,1	69,5	95	33	11,7	9,3	0,3	6,5	8,8	73	SE	3	543,2
26	13,2	19,4	10,2	71,2	94	32	11,8	9,4	0,5	2,8	0,2	2	SE	1,6	544,5
27	11,9	17,5	10	67,4	96	29	12,1	9,8	9,7	1	0	0	SE	0,8	544,5
28	13,8	21	8,6	74,5	95	33	12,2	9,9	0,2	3,7	4,8	40	NE	0,5	543,8
<b>SUMA</b>	<b>393,9</b>	<b>606,6</b>	<b>254,3</b>	<b>1987,9</b>	<b>2679</b>	<b>921</b>	<b>322,2</b>	<b>252,1</b>	<b>17,7</b>	<b>132,3</b>	<b>138,7</b>	<b>1156</b>	<b>SE</b>	<b>50,3</b>	<b>15213</b>
<b>MEDIA</b>	<b>14,1</b>	<b>21,7</b>	<b>9,1</b>	<b>71</b>	<b>95,7</b>	<b>32,9</b>	<b>11,5</b>	<b>9</b>		<b>4,7</b>	<b>5</b>	<b>41,3</b>		<b>1,8</b>	<b>543,3</b>

**ANEXO C: MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, MARZO (2022)**

FECHA	TEMPERATURA °C			HUMEDAD RELATIVA %			TENSIÓN VAPOR	PUNTO ROCIO	PRECIP.	EVAPORA.	HELIOFANIA		VIENTO		PRESIÓN ATM.
	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	mlb	°C	mm H <sub>2</sub> O	mm	Horas	%	Dirección	Veloc.	mm hg
1	12,7	20,3	9,8	84	96	44	12,8	10,7	2,1	3,4	1,3	11	SE	1	542,7
2	12,3	20,2	9,4	88,6	96	47	12,9	10,8	2,6	3,2	1,5	13	NE	0,8	543,3
3	12,1	17,2	9,1	86,1	96	61	12,5	10,3	0,8	5,2	0,6	5	SW	0,3	544
4	13	19,8	9,1	80,8	96	44	12,6	10,4	4,2	4,8	3,7	31	SE	0,8	544,3
5	13,1	18,6	9,2	79,9	96	53	12,4	10,2	0,8	4,3	2,3	19	SE	1,4	543,8
6	12,9	20,2	8,3	78	96	37	11,7	9,3	0,8	2,9	4,4	37	SE	2	543,8
7	13,1	19	8,2	77,5	95	47	11,8	9,3	0	4,8	1	8	SE	2	544,5
8	13,1	19,8	8,9	78,9	94	55	12,4	10,2	0,1	4,8	1,7	14	SE	1,2	544,4
9	13,4	19,6	9	76,2	92	47	12,2	9,9	0	4,8	1,8	15	SE	1,3	544,5
10	12,6	19,6	9,3	80,6	96	40	11,8	9,4	0	4,4	1,8	15	SE	1	544,4
11	11,7	16,5	8,7	88	97	54	12,5	10,2	0	4,3	0	0	SE	0,5	544,4
12	12,8	20,2	7,3	80,9	97	42	12,2	9,9	0	3,7	3,2	27	SE	1,8	544,1
13	13,1	20,6	8,7	77,8	95	39	11,8	9,4	0	3,9	4,2	35	SE	1,4	544,3
14	12,5	22,5	7,7	75,7	94	34	11,1	8,5	0	3,7	5,7	48	SE	1,2	543,9
15	12,6	17,9	7,2	75,9	94	49	11,2	8,7	0	2,13	0,1	1	SW	1,6	544
16	12,4	18,4	8,6	82,8	95	51	11,4	8,8	0	3,6	0,8	7	SE	0,8	544,4
17	12,3	20,8	9	85,1	96	43	12,1	9,8	0	2,1	3,6	30	SE	1	544
18	12,3	19,3	6,3	76,1	96	37	11,1	8,5	0	5,3	1,2	10	SE	1	544,7
19	12	21	6,1	79	96	33	11,4	8,9	0	3,7	1,9	16	SW	1	543,8
20	13,9	21,8	7	61,5	91	30	10,2	7,3	0	4,4	6,1	51	SE	1,6	543
21	12,8	19,5	7,6	73,3	95	35	11	8,3	7,9	3	0,7	6	SE	1	544,1
22	12,9	20,5	7,3	76,2	95	38	11,2	8,6	0	6,5	2,9	24	SE	1,2	544,1
23	12,6	20,4	8,2	78,8	95	40	11,9	9,5	1,4	5,5	4,1	34	SE	0,8	544,5
24	12,8	21,8	7,8	77,3	96	36	11,9	9,5	4,4	0,8	3,4	28	NE-NW	1,3	544,5
25	13,4	21,8	6,6	71,7	96	35	11,6	9	0,7	4,6	8,4	70	SE	2,3	544,5
26	13,9	21,8	9,6	75,4	92	35	12,1	9,8	0,6	1,3	4,6	38	SE	2,4	543,6
27	14,4	20,9	9,5	72,7	93	40	12,3	10	1,7	2,3	6,4	53	SE	1,4	542,8
28	13,9	21,3	9,3	72,8	93	43	11,8	9,4	3,5	3,2	2,7	23	SE	2	542,7
29	14	20,5	9,1	71,5	95	41	11,7	9,3	11,9	3	4,6	38	SE	2,4	543,3
30	13,5	20	9	68,2	93	39	11,6	9,1	1,7	2,2	4,7	39	SE	2,8	543,6
31	13,5	19,9	6,6	71	90	43	11,8	9,4	7,1	3,9	2,3	19	SE	2	543,6
<b>SUMA</b>	<b>401,4</b>	<b>621,7</b>	<b>257,5</b>	<b>2402</b>	<b>2937</b>	<b>1312</b>	<b>366,9</b>	<b>292,3</b>	<b>135</b>	<b>123,9</b>	<b>91,7</b>	<b>764,2</b>	<b>SE</b>	<b>42,9</b>	<b>16861,4</b>
<b>MEDIA</b>	<b>12,9</b>	<b>20,1</b>	<b>8,3</b>	<b>77,5</b>	<b>94,7</b>	<b>42,3</b>	<b>11,8</b>	<b>9,4</b>			<b>3</b>	<b>24,7</b>		<b>1,4</b>	<b>543,9</b>

**ANEXO D: MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, ABRIL (2022)**

FECHA	TEMPERATURA °C			HUMEDAD RELATIVA %			TENSIÓN VAPOR	PUNTO ROCIO	PRECIP.	EVAPOR.	HELIOFANÍA		VIENTO		PRESIÓN ATM.
	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	mlb	°C	mm H <sub>2</sub> O	mm	Horas	%	Direc.	Veloc.	mm hg
1	14,8	23,2	8,9	68,3	93	34	11,8	9,3	2,1	5,2	8	67	SE	1,8	543
2	15,3	22,8	8,4	68,2	93	33	12	9,7	3,9	4	8,4	70	NW	2	542,3
3	13,1	17,8	9,6	82,4	95	60	12,7	10,5	0	7,2	1,9	16	SE	1,2	543,4
4	12	17,2	8,3	80	95	53	11,7	9,2	0	2,7	0,6	5	SE	1,4	544,2
5	13,6	21,4	8	71,6	95	35	11,5	9	1	3,3	5,9	49	SE	2,4	543,6
6	13,9	20,4	7,9	70,2	94	41	11,7	9,3	0,2	4,5	5,5	46	SE	3,3	543,9
7	13,7	19,7	8,6	76,5	94	49	12	9,7	0	4,7	2,7	23	SE	2,5	544,3
8	14	20,8	8,6	72	96	36	11,9	9,5	15	4	7	58	SE	2,5	544,4
9	12,2	21,3	7,4	75,9	94	42	11,5	9	1,7	1,5	4,3	36	SE	1,6	544,5
10	13,7	22	6,2	69,2	97	35	10,9	8,2	1,8	5,2	8,8	73	SE	1,8	543,8
11	13,4	20,2	8,7	69,6	93	41	10,8	8,1	0,3	5,3	2,7	23	SE	2,3	543,9
12	12,3	18,3	6,3	71,8	92	45	10,4	7,5	0	3,4	0,5	4	SE	2,2	544,2
13	13,7	21,2	8	74,3	95	39	11,8	9,4	1,8	1,8	3,8	32	SE	1	544,7
14	13,9	19,8	9,1	75,2	94	46	12,1	9,7	1	3,3	2,7	23	SE	1,3	544,8
15	13,8	21,6	9,3	75,7	96	40	12,4	10,1	0,3	1,1	3,2	27	SE	2	543,8
16	14,3	22,9	7,5	68,3	96	31	11,1	8,5	0	5,6	7	58	SE	1,6	543,5
17	12,1	18	9	81,4	94	56	12	9,6	0	2,9	0,9	8	SE	1	544,4
18	13,2	20,5	6,6	71,5	93	43	11,2	8,5	5,4	4,5	4,6	38	SE	1,6	544,2
19	11,9	17,6	8,4	82,7	96	50	11,6	9,2	12,3	2,2	1,5	13	SE	1	545,4
20	13,8	20,6	8,1	73,2	96	41	12,1	9,8	11	3,2	6	50	SE	1	545
21	13,4	21	9,4	78,8	95	43	12,4	10,2	6,1	2,8	5,6	47	SE	1,3	544,9
22	14,4	21,2	8,6	70,4	94	40	12,1	9,8	2,5	3	7,8	65	SE	1,8	544,4
23	13,7	20	9,4	75,8	95	53	11,7	9,3	3,9	4,2	4,9	41	SE	1,5	543,8
24	14,1	21,7	8,7	72,8	96	36	11,5	9,1	6	3,8	5	42	SE	1,8	544,2
25	15,3	22,4	9,8	66,8	94	34	11,5	9	1,3	3,2	8	67	SE	2,2	543,4
26	14,1	20,2	9,6	74,3	95	42	12,4	10,1	0	6,1	4,5	38	SE	2	543,7
27	13,8	23	9,5	74,5	94	38	12	9,7	0	2,9	5	42	SE	2,2	543,7
28	13,3	19,1	8,9	77,4	96	42	12,1	9,7	0,2	2,4	0,2	2	SE	1	544,4
29	12,9	17,8	9,1	82,8	96	56	12,9	10,7	0	3,1	0,2	2	SE	1	544,4
30	11,3	17,4	7	85,8	97	56	11,6	9,2	0	4,5	1,8	15	SE	1	545
<b>SUMA</b>	<b>405,2</b>	<b>611,1</b>	<b>252,9</b>	<b>2237,3</b>	<b>2843</b>	<b>1290</b>	<b>353</b>	<b>280,4</b>	<b>65,8</b>	<b>113,9</b>	<b>129</b>	<b>1075</b>	<b>SE</b>	<b>51,2</b>	<b>16323,2</b>
<b>MEDIA</b>	<b>13,5</b>	<b>20,4</b>	<b>8,4</b>	<b>74,6</b>	<b>94,8</b>	<b>43</b>	<b>11,8</b>	<b>9,3</b>		<b>3,9</b>	<b>4,3</b>	<b>36</b>		<b>1,7</b>	<b>544,1</b>

ANEXO E: MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, MAYO (2022)

FECHA	TEMPERATURA °C			HUMEDAD RELATIVA %			TENSIÓN VAPOR	PUNTO ROCIO	PRECIP.	EVAPOR..	HELIOFANÍA		VIENTO		PRESIÓN ATM.
	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	mlb	°C	mm H <sub>2</sub> O	mm	Horas	%	Direc.	Veloc.	mm hg
1	12,7	21	8,3	80	97	44	11,1	8,6	0	3,3	5,9	49	SE	1,4	544,9
2	12,5	20,3	7,3	79	96	40	12	9,6	0	3,9	2,2	18	SE	0,8	545,2
3	11,6	15,8	8,2	84,1	96	55	11,8	9,4	0	5,7	0,1	1	SE	0,8	545,5
4	13	21,5	5,8	70,7	95	37	11,4	8,9	2,5	1,6	6,5	54	SE	0,8	545,5
5	14,2	21,6	7,2	72,5	94	39	11,9	9,6	1,9	1,8	7,1	59	NE	1,3	545,4
6	13,6	21,4	7,2	71,5	94	41	11,6	9,2	1	2,8	6,5	54	SE	1,8	545,2
7	12,9	17,5	8,7	80,1	97	54	12,2	9,9	1,2	6	0	0	SE	1,3	544,7
8	13	19,7	9,2	82,3	96	45	12,2	9,9	0	2,4	2,5	21	SE	1	544,8
9	12,8	18,6	8,2	78,7	96	48	11,9	9,6	0	3,7	0,7	6	SE	1,4	545
10	13	19,6	8,5	74,7	95	44	11,8	9,3	0	5,6	5,4	45	SE	2	544,6
11	12,7	19,5	7,5	76	96	42	11,8	9,4	6,3	3,3	2,8	23	SE	1,5	544,5
12	12,3	18,3	6,1	78,8	94	54	12	9,7	4,2	3,4	1,1	9	SE	1,2	544,5
13	14,1	21,1	8,1	74	94	41	12,3	10	0,8	2,9	4,9	41	SE	2,8	544,2
14	14,4	20,9	9,2	75,3	95	42	13	10,8	4	1,6	3,7	31	SE	1,3	544,4
15	13,4	18,3	9,7	82	97	51	12,5	10,3	7,6	3,2	0	0	SE	1,2	544,4
16	13,4	19,5	9,5	83,6	97	57	13,3	11,2	4	1,1	2,3	19	SE	1,4	544,7
17	14	20,6	9,8	80,4	97	42	13,5	11,5	5,5	1	4	33	SE	2,4	544,9
18	12,1	17,3	7,3	79,8	96	49	11,6	9,2	2,9	1,9	2,5	21	SE	1,3	546
19	13,2	20,2	7,2	76,4	94	44	12,2	9,9	0	2,8	4,1	34	SE	1,8	545,1
20	14,2	21	8,7	72,7	95	38	12	9,6	0	5,5	4,2	35	SE	1,3	544,8
21	14,8	21,6	9,6	70,6	94	39	12,3	10	0	5,6	6,7	56	SE	1,6	543,9
22	14,3	21,2	8,8	73,1	95	38	12,2	9,9	0	5,4	5,6	47	SE	2	544,2
23	14,2	20,8	9,5	73,6	96	37	11,8	9,4	2	5,5	4,2	35	SE	1,8	544
24	14,2	19,6	9,7	73,3	96	40	11,8	9,3	0	4,3	4,2	35	SE	1,7	544,4
25	14,2	21,5	9,3	74	94	46	12,9	10,7	0,4	3,6	2,4	20	SE	2,3	545,1
26	13,5	20,3	9,1	73,6	95	46	12,3	10	0	4	3,3	28	SE	2,8	545,8
27	14	21,3	8,7	72,9	94	38	11,9	9,6	0	2,8	6,7	56	SE	2	545,6
28	14,9	22,6	7,6	64	91	31	10,9	8,3	0	2,8	9,3	78	SE	2,2	544,2
29	15	23,5	7	65,1	94	29	11,3	8,8	0	5	10,1	84	SE	1,4	543,4
30	12,1	14,7	10	84,5	94	70	12,4	10,2	0,4	2,6	0	0	SE	1,2	545,5
31	13	19,1	6,4	73,6	92	46	11,8	9,4	0	4,2	2,7	23	SE	1	545,6
<b>SUMA</b>	<b>417,3</b>	<b>619,9</b>	<b>257,4</b>	<b>2350,8</b>	<b>2946</b>	<b>1367</b>	<b>373,8</b>	<b>301</b>	<b>33,3</b>	<b>109,9</b>	<b>121,7</b>	<b>1014,2</b>	<b>SE</b>	<b>48,2</b>	<b>16889,7</b>
<b>MEDIA</b>	<b>13,5</b>	<b>20</b>	<b>8,3</b>	<b>75,8</b>	<b>95</b>	<b>44,1</b>	<b>12,1</b>	<b>9,7</b>		<b>3,5</b>	<b>3,9</b>	<b>32,7</b>		<b>1,6</b>	<b>544,8</b>

ANEXO F: MATRIZ DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, JUNIO (2022)

FECHA	TEMPERATURA °C			HUMEDAD RELATIVA %			TENSIÓN VAPOR	PUNTO ROCÍO	PRECIP.	EVAPOR.	HELIOFANÍA		VIENTO		PRESIÓN ATM.
	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	mlb	°C	mm H <sub>2</sub> O	mm	Horas	%	Direc.	Veloc.	mm Hg
1	14,6	22,2	7	67,8	94	37	12	9,7	0	1,2	10,3	86	SE	1,8	544,5
2	14,9	22,4	9,8	70,3	97	37	11,9	9,4	0,1	4,6	8,3	69	SE	2	544
3	13,4	21,7	8,7	74,4	97	36	11,9	9,4	5	0,8	5	42	SE	1,5	544,7
4	13,1	20,8	5,8	73,1	98	39	11,2	8,6	0	3,5	7,4	62	SE	1,4	544,9
5	14,1	23	8,3	68,7	94	32	11,1	8,5	0	2,8	7,1	59	SE	1,6	544
6	12,9	18,9	7,8	82,5	96	58	12,1	9,8	0	5,4	1,3	11	SE	1,6	544,5
7	12,2	15,4	9	86,2	97	65	12,6	10,3	3,7	3,6	0	0	SE	1	544,6
8	12,3	16,9	8,3	87,1	97	62	12,6	10,4	20,5	4,6	1,3	11	SE	1,3	545,2
9	14	22,1	7,3	73,3	97	34	11,8	9,4	0,3	3,3	7,7	64	SE	1	545,4
10	14,3	22,8	7,5	66,1	94	28	11,1	8,5	0,5	2	7,4	62	SE	2	545,2
11	12,3	18,3	7,7	80,6	95	55	11,6	9,1	0,4	2,1	5	42	NE-SE	1,6	544,9
12	13,7	21,8	7,6	74,6	98	35	11,9	9,5	0	3,3	7,1	59	SE	1,8	544,1
13	12	17,4	7,2	82,2	97	56	11,8	9,5	0	3,8	2,2	18	SE	1,2	545,4
14	14,3	21,4	9	73,4	97	38	12,4	10,2	0	5,7	5,9	49	SE	2,2	544,7
15	10,6	14,7	7,5	89,6	96	75	11,7	9,3	0	5,5	0	0	SE	0,8	546
16	12,4	18,8	6,6	79,3	96	46	11,9	9,5	0	4,7	4,8	40	SE-SW	1,3	545,2
17	12,7	19,6	8,5	77,7	96	44	11,7	9,3	0	5	1,8	15	SE	2	544,9
18	12,3	17,8	7,3	80,1	95	54	11,7	9,3	3,1	3,4	1,8	15	SE	1,8	544,8
19	12,1	17,8	8,8	82,2	98	46	11,8	9,4	8,8	3,2	1,8	15	SW-SE	1,2	545,2
20	12,5	18,7	7,7	75,8	97	43	11,5	9,1	0	5,4	4,1	34	SE	1,8	545,8
21	11,3	16,4	6,4	79	97	50	11	8,4	0,2	3,7	0,9	8	SE	1,4	545,7
22	12,4	20,1	2,4	66,6	97	34	9,9	6,7	4,5	1,1	10,2	85	SE	2,3	545,7
23	11,6	20	5,5	81,5	97	44	11,4	8,9	11,7	4,4	5,1	43	SE	1,3	546
24	13,6	21	7	71,9	98	36	11,4	8,9	3,7	4,3	8,7	73	SE	1,8	544,8
25	12,9	18,6	8,7	74	95	39	11,2	8,6	0,6	2,3	5,2	43	SE	1,4	544,6
26	12,6	19,6	7,2	74,5	96	38	10,7	8	0	2,3	4,8	40	SE	1,6	544,4
27	12,2	19,3	6,9	77,9	97	46	11	8,4	0	4,8	3,8	32	SE	1,3	544,9
28	12,7	20,1	7,4	74	97	40	11,1	8,5	0	4,8	4,8	40	SE	2,6	545,1
29	13	20,2	6,7	68,4	96	35	10,4	7,6	0	3,8	6,6	55	NE	2	545,7
30	12,3	18,6	6,8	76,8	97	46	11,4	9	0,1	2,9	5,4	45	SE	1,8	544,8
<b>SUMA</b>	<b>385,3</b>	<b>586,4</b>	<b>222,4</b>	<b>2289,7</b>	<b>2893</b>	<b>1328</b>	<b>345,6</b>	<b>270,9</b>	<b>70,3</b>	<b>112,6</b>	<b>145,8</b>	<b>1215</b>	<b>SE</b>	<b>47,9</b>	<b>16349,3</b>
<b>MEDIA</b>	<b>12,8</b>	<b>19,5</b>	<b>7,4</b>	<b>76,3</b>	<b>96,4</b>	<b>44,3</b>	<b>11,5</b>	<b>9</b>		<b>3,8</b>	<b>4,9</b>	<b>40,5</b>		<b>1,6</b>	<b>545</b>



**ANEXO G: MATRIZ DE RESUMEN DE DATOS METEOROLÓGICOS Y PLUVIOMÉTRICOS, PRIMER SEMESTRE AÑO 2022**

	PRECIPITACIÓN	PRECIPITACIÓN (Media)	EVAPORACIÓN	EVAPORACIÓN (Media)	TEMPERATURA °C		
					Media	Máxima	Mínima
<b>ENERO</b>	0	1,43	1,4	5	14	22,4	8,4
	0		3,9				
	0		6,6				
	0		6				
	3,2		7				
	0		5,9				
	0		6,2				
	0		5,7				
	0		5,4				
	0		3,3				
	0,2		5,7				
	0		6,9				
	1,2		6,8				
	0		5,7				
	4,3		4,9				
	0		4,2				
	0		5				
	0		4,8				
	0		5				
	0		3				
	0,9		5,7				
	0		4				
	0		6,5				
	0		6,8				
	0,6		3,4				
	0		5,4				
	13,5		5,2				
	10,3		5,4				
	0		6,9				
	0,3		2,2				
9,8		1,8					

<b>FEBRER O</b>	0	<b>0,63</b>	4,8	<b>4,74</b>	<b>14,1</b>	<b>21,7</b>	<b>9,1</b>
	0		6,1				
	0		5,5				
	0		6,5				
	0		5,6				
	0		3,8				
	0,5		1,6				
	0		4,4				
	0		3,3				
	0		6,9				
	0,9		4,4				
	0		5,5				
	0		4,7				
	0		5,2				
	0		4,7				
	0		5,5				
	0		6,1				
	0		4,5				
	0		4,7				
	0		5				
	0		4,8				
	0		6,2				
	5,3		6,2				
	0,3		2,9				
	0,3		6,5				
	0,5		2,8				
9,7		1					
0,2		3,7					
2,1	<b>1,69</b>	3,4	<b>3,73</b>	<b>12,9</b>	<b>20,1</b>	<b>8,3</b>	
2,6		3,2					
0,8		5,2					
4,2		4,8					
0,8		4,3					
0,8		2,9					
0		4,8					
<b>MARZO</b>							

	0,1		4,8				
	0		4,8				
	0		4,4				
	0		4,3				
	0		3,7				
	0		3,9				
	0		3,7				
	0		2,13				
	0		3,6				
	0		2,1				
	0		5,3				
	0		3,7				
	0		4,4				
	7,9		3				
	0		6,5				
	1,4		5,5				
	4,4		0,8				
	0,7		4,6				
	0,6		1,3				
	1,7		2,3				
	3,5		3,2				
	11,9		3				
	1,7		2,2				
	7,1		3,9				
	2,1	2,59	5,2	3,72	13,5	20,4	8,4
	3,9		4				
	0		7,2				
	0		2,7				
	1		3,3				
	0,2		4,5				
	0		4,7				
	15		4				
	1,7		1,5				
	1,8		5,2				
	0,3		5,3				
<b>ABRIL</b>							

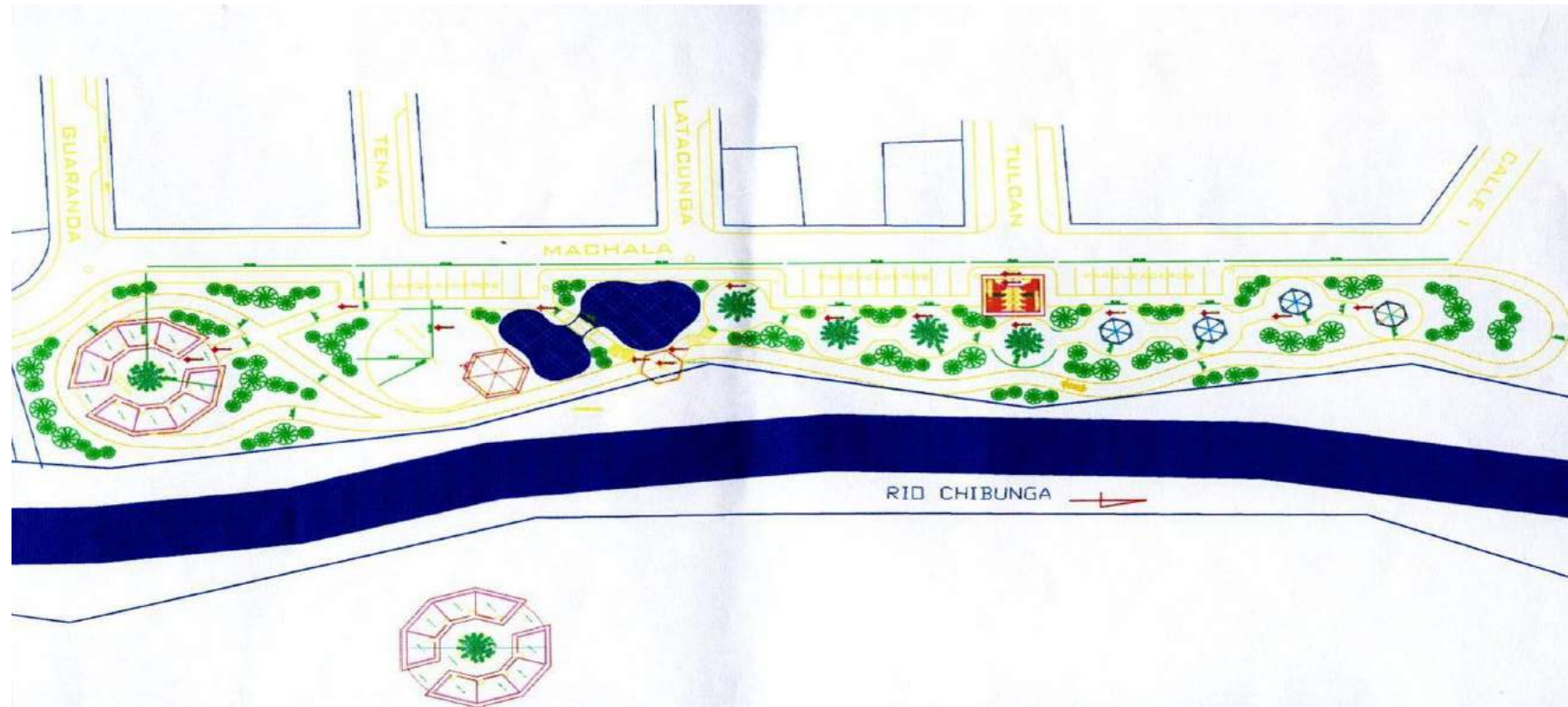
	0		3,4			
	1,8		1,8			
	1		3,3			
	0,3		1,1			
	0		5,6			
	0		2,9			
	5,4		4,5			
	12,3		2,2			
	11		3,2			
	6,1		2,8			
	2,5		3			
	3,9		4,2			
	6		3,8			
	1,3		3,2			
	0		6,1			
	0		2,9			
	0,2		2,4			
	0		3,1			
	0		4,5			
	0	<b>1,44</b>	3,3	<b>3,53</b>	<b>13,5</b>	<b>20</b>
	0		3,9			<b>8,3</b>
	0		5,7			
	2,5		1,6			
	1,9		1,8			
	1		2,8			
	1,2		6			
	0		2,4			
	0		3,7			
	0		5,6			
	6,3		3,3			
	4,2		3,4			
	0,8		2,9			
	4		1,6			
	7,6		3,2			
	4		1,1			
<b>MAYO</b>						

	5,5		1			
	2,9		1,9			
	0		2,8			
	0		5,5			
	0		5,6			
	0		5,4			
	2		5,5			
	0		4,3			
	0,4		3,6			
	0		4			
	0		2,8			
	0		2,8			
	0		5			
	0,4		2,6			
	0		4,2			
	0	<b>2,11</b>	1,2	<b>3,61</b>	<b>12,8</b>	<b>19,5</b>
	0,1		4,6			<b>7,4</b>
	5		0,8			
	0		3,5			
	0		2,8			
	0		5,4			
	3,7		3,6			
	20,5		4,6			
	0,3		3,3			
	0,5		2			
	0,4		2,1			
	0		3,3			
	0		3,8			
	0		5,7			
	0		5,5			
	0		4,7			
	0		5			
	3,1		3,4			
	8,8		3,2			
	0		5,4			
<b>JUNIO</b>						

	0,2
	4,5
	11,7
	3,7
	0,6
	0
	0
	0
	0
	0,1

3,7
1,1
4,4
4,3
2,3
2,3
4,8
4,8
3,8
2,9

## ANEXO H: PROPUESTA INTEGRAL DE MEJORAMIENTO URBANO DEL RÍO CHIBUNGA MEDIANTE TÉCNICAS LID



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL**

MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA  
EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO LAS  
HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022.



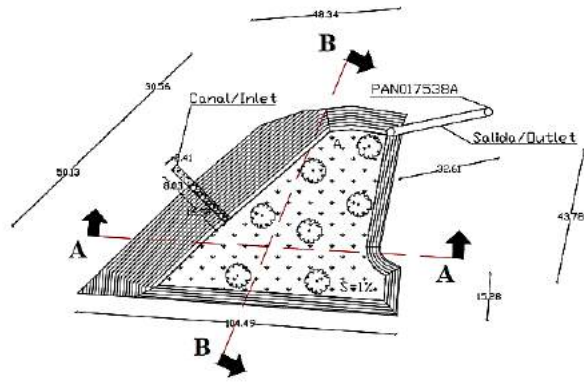
**TRABAJO DE TITULACIÓN**

2022-11-22

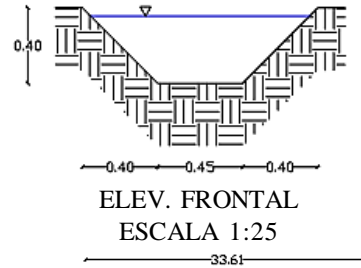
AUTOR: JOEL NARANJO

DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ

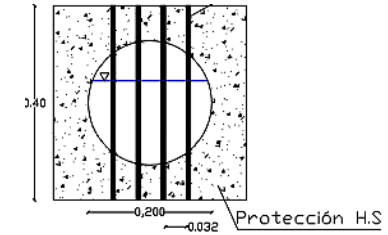
# ANEXO I: PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE



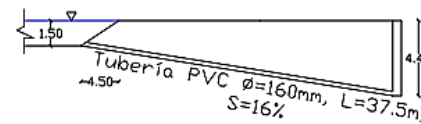
PLANTA  
ESCALA 1:1000



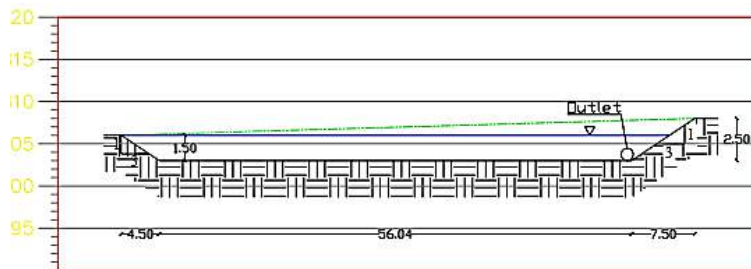
ELEV. FRONTAL  
ESCALA 1:25



ELEV. FRONTAL  
ESCALA 1:20

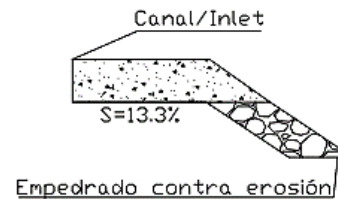


ELEV. LATERAL  
ESCALA 1:250



CORTE B-B

Escala Vertical: 1:250 Escala Horizontal: 1:500



ELEV. LATERAL

Leyenda		Cuadro de áreas	
	Pasto sembrado	A Superior	
	Protección contra erosión	A Inferior	3475.05m <sup>2</sup>
	Canal de hormigón	A aportante	2346.32m <sup>2</sup>
	Perfil de terreno	A=11.979ha	
	Nivel de agua r.	Profundidad	
	Perfil de proyecto	h2=1.50m	



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  
INGENIERÍA AMBIENTAL

MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022.



TRABAJO DE TITULACIÓN

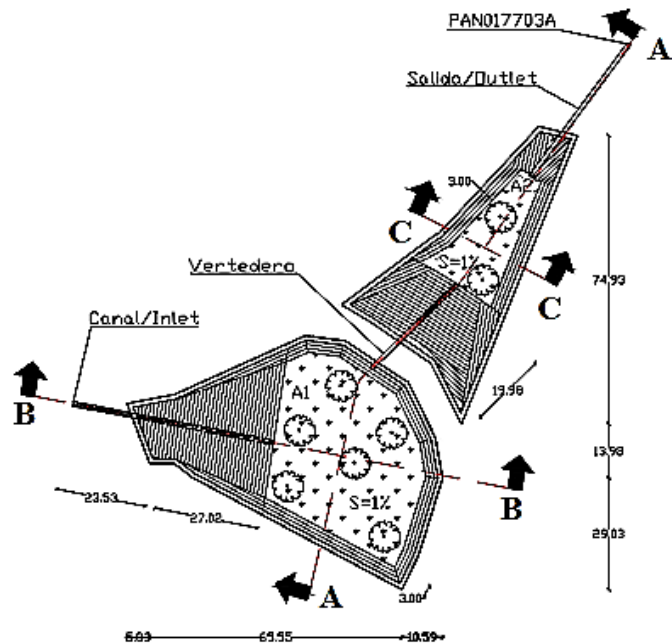
2022-11-22

AUTOR: JOEL NARANJO

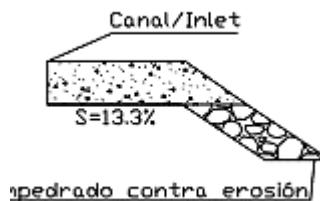
DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ



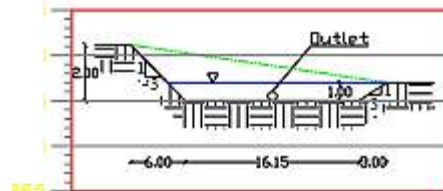
**ANEXO J: PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE**



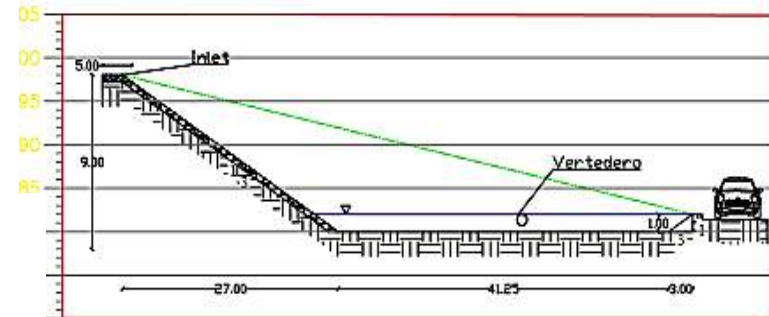
PLANTA  
ESCALA 1:1000



pedrado contra erosión  
ELEV. LATERAL



CORTE C-C  
Escala Vertical: 1:250 Escala Horizontal: 1:5001:250



CORTE B-B  
Escala Vertical: 1:125 Escala Horizontal: 1:500

Leyenda		Cuadro de áreas	
	Pasto sembrado	A1 Superior	2196.38m <sup>2</sup>
	Protección contra erosión	A1 Inferior	1588.15m <sup>2</sup>
	Canal de hormigón	A2 Superior	773.60m <sup>2</sup>
	Perfil de terreno	A2 Inferior	451.07m <sup>2</sup>
	Nivel de agua r.	A aportante	7.84ha
	Perfil de proyecto	Profundidad	1.00m



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  
INGENIERÍA AMBIENTAL

MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022.

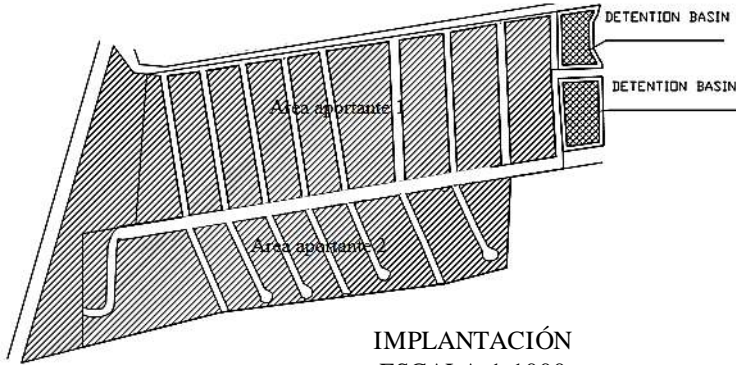
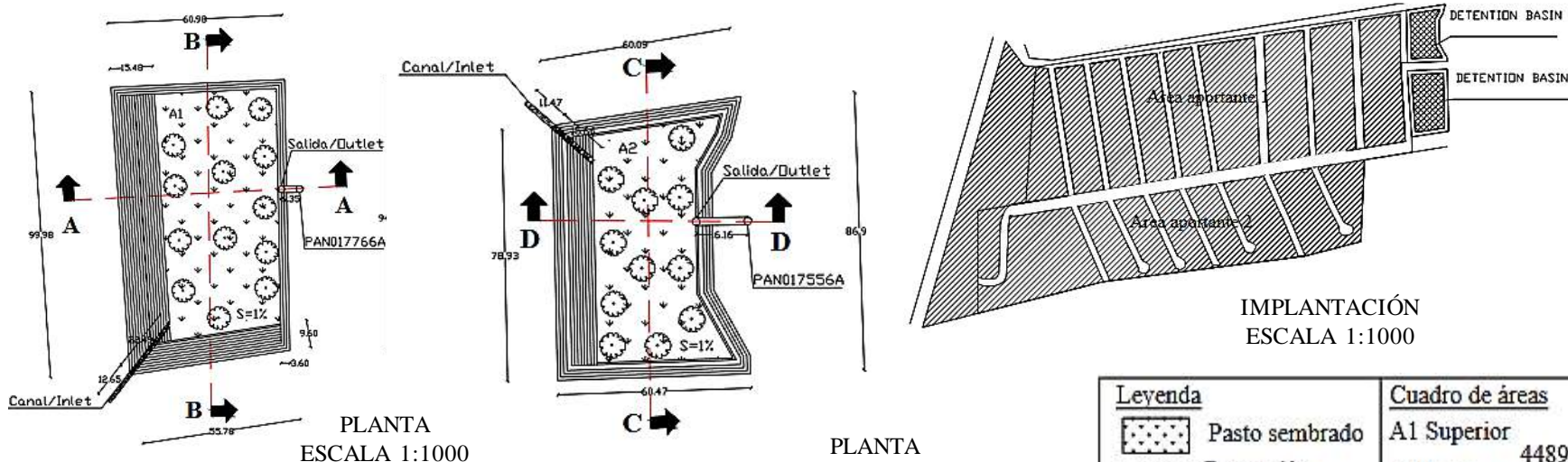


TRABAJO DE TITULACIÓN

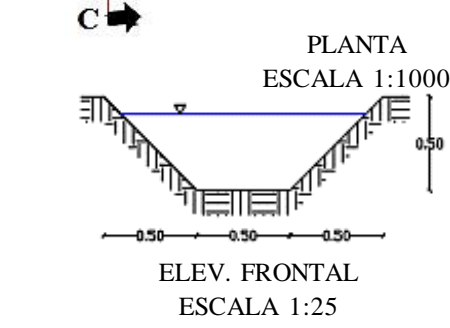
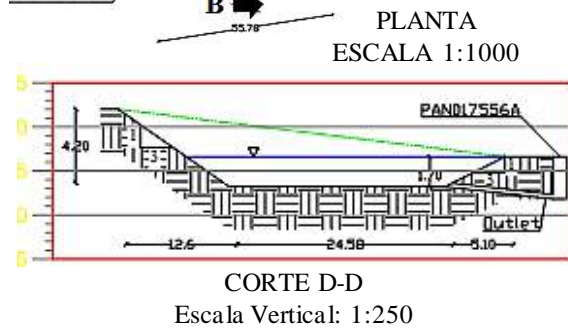
2022-11-22

AUTOR: JOEL NARANJO  
DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ

ANEXO K: PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE



IMPLANTACIÓN  
ESCALA 1:1000



Legenda	Cuadro de áreas
Pasto sembrado	A1 Superior 4489.86m <sup>2</sup>
Protección contra erosión	A1 Inferior 3456.86m <sup>2</sup>
Canal de hormigón	A2 Superior 3689.95m <sup>2</sup>
Perfil de terreno	A2 Inferior 2511.89m <sup>2</sup>
Nivel de agua r.	A aportante
Perfil de proyecto	A1=10.2ha A2=11.09ha
	Profundidad h1=1.20m h2=1.70m



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  
INGENIERÍA AMBIENTAL

MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022.

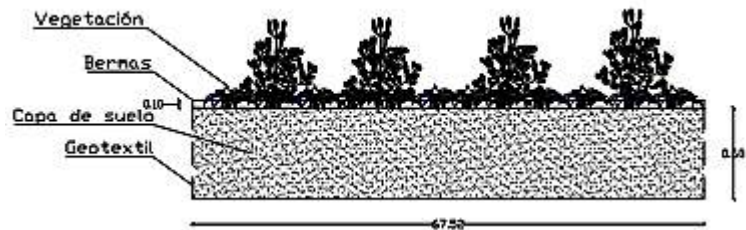


TRABAJO DE TITULACIÓN

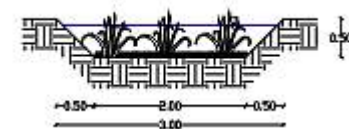
2022-11-22

AUTOR: JOEL NARANJO  
DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ

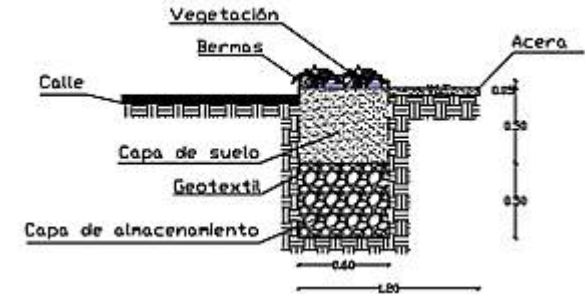
**ANEXO L: PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE**



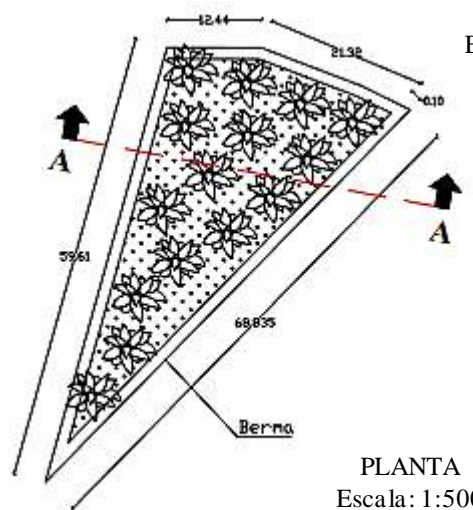
CORTE A-A  
ESCALA 1:25



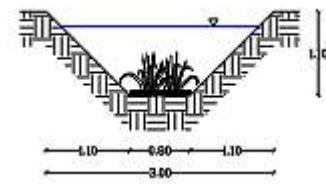
ELEV. FRONTAL  
ESCALA 1:50



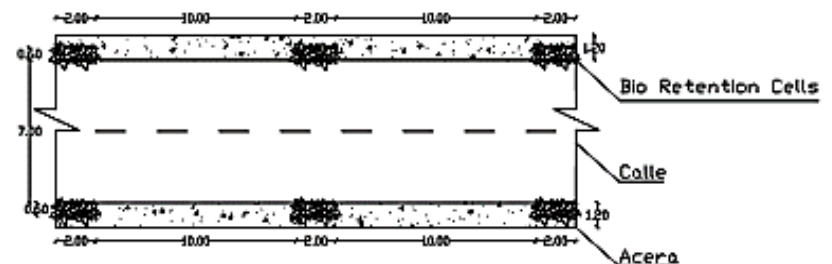
ELEVACIÓN CELDA DE BIORETENCIÓN  
Escala: 1:25



PLANTA  
Escala: 1:500



ELEV. FRONTAL  
ESCALA 1:50



PLANTA CELDA DE BIORETENCIÓN  
Escala: 1:200



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL**

MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA  
EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO  
LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022.

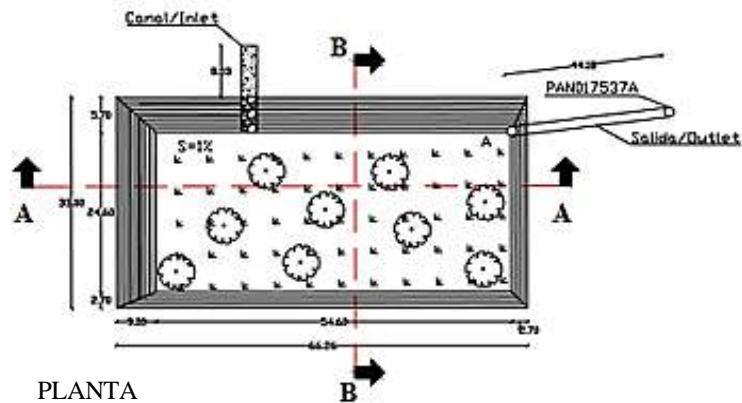


**TRABAJO DE TITULACIÓN**

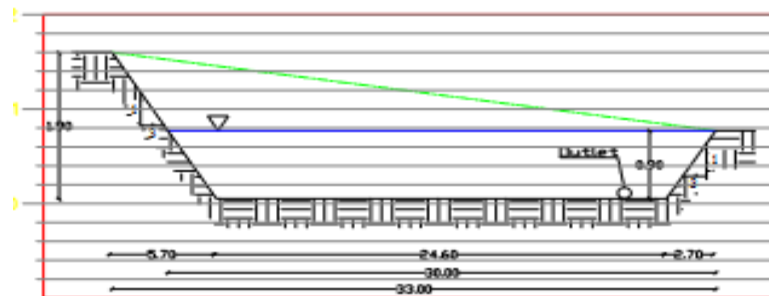
2022-11-22

AUTOR: JOEL NARANJO  
DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ

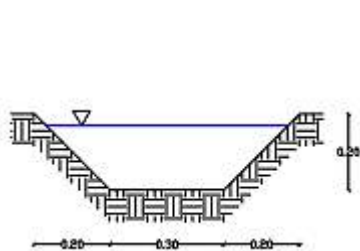
**ANEXO M: PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE**



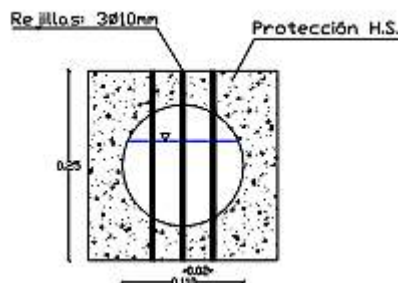
PLANTA  
ESCALA 1:500



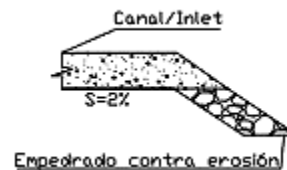
CORTE B-B  
Escala Vertical: 1:50 Escala Horizontal: 1:250



ELEV. FRONTAL  
ESCALA 1:10



ELEV. FRONTAL  
ESCALA 1:10



ELEV. LATERAL

Leyenda		Cuadro de áreas	
	Pasto sembrado	A Superior	1800.00m <sup>2</sup>
	Protección contra erosión	A Inferior	
	Canal de hormigón	A aportante	A=2.396ha
	Perfil de terreno	Profundidad	h2=0.90m
	Nivel de agua r.		
	Perfil de proyecto		



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL**

MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022.



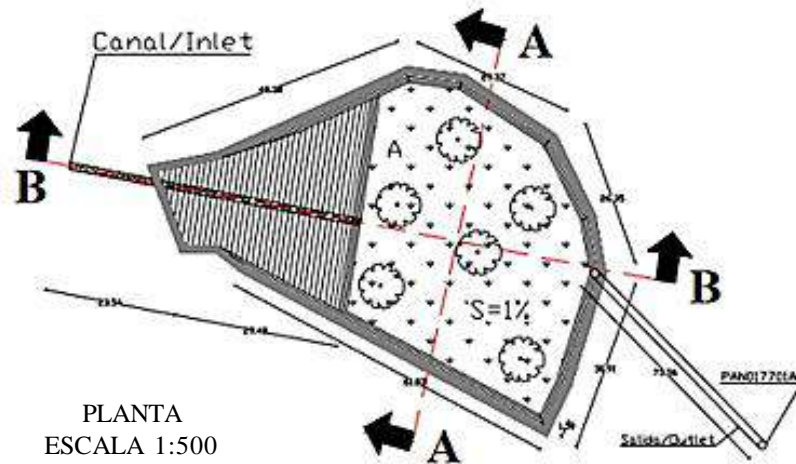
**TRABAJO DE TITULACIÓN**

2022-11-22

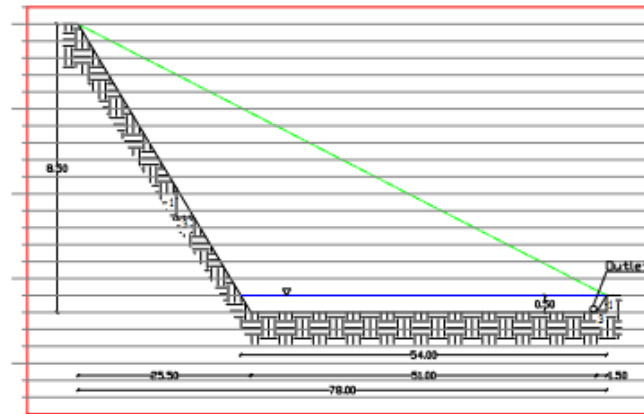
AUTOR: JOEL NARANJO  
DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ



**ANEXO N: PLANO DE TÉCNICAS LIDS PARA LA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN SOSTENIBLE**

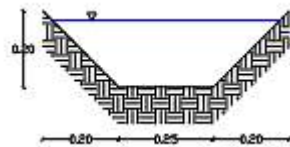


PLANTA  
ESCALA 1:500

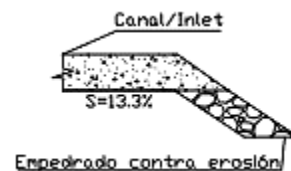


CORTE B-B

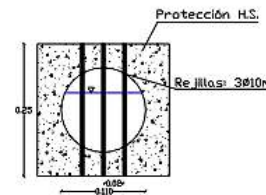
Escala Vertical: 1:100 Escala Horizontal: 1:500



ELEV. FRONTAL  
ESCALA 1:10



ELEV. LATERAL



ELEV. FRONTAL  
ESCALA 1:10

Leyenda		Cuadro de áreas	
	Pasto sembrado	A Superior	2022.26m <sup>2</sup>
	Protección contra erosión	A Inferior	1770.0m <sup>2</sup>
	Canal de hormigón	A aportante	1.57ha
	Perfil de terreno	Profundidad	0.50m
	Nivel de agua r.		
	Perfil de proyecto		



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL**

MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022.

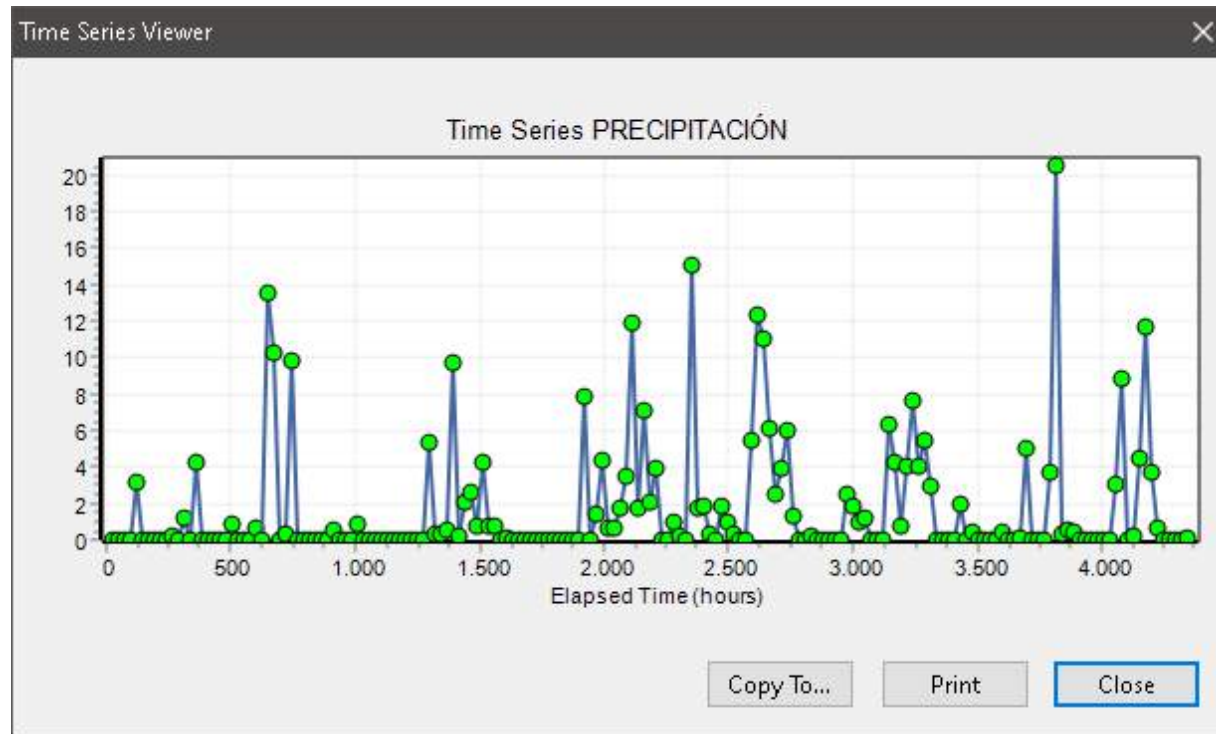


**TRABAJO DE TITULACIÓN**

2022-11-22

AUTOR: JOEL NARANJO  
DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ

**ANEXO O: REPRESENTACIÓN DE LA SERIE TEMPORAL EN PC-SWMM (PRECIPITACIÓN)**



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL**

MODELADO BASADO EN DESARROLLO DE BAJO IMPACTO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA  
EN SU TRAYECTO POR EL ÁREA URBANA DEL CANTÓN RIOBAMBA APLICANDO  
LAS HERRAMIENTAS DEL SOFTWARE PC-SWMM, AÑO 2022.



**TRABAJO DE TITULACIÓN**

2022-11-22

AUTOR: JOEL NARANJO

DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ



epoch

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 06/10/2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Marcos Joel Naranjo Chuquisala
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Ambiental
<b>Título a optar:</b> Ingeniero Ambiental
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo



2487-DBRA-UTP-2022