

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

**Análisis del comportamiento hidráulico en la red de drenaje pluvial,
implementando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, en el sector de la
Universidad del Azuay-Cuenca**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Civil

Autor:

Diego Alexander Chimbo Yunga

Director:

Esteban Remigio Sánchez Cordero

ORCID: 0000-0002-8206-386X

Codirector:

María Mercedes Ojeda Muñoz

ORCID: 0009-0002-8494-8183

Cuenca, Ecuador

2023-11-13

Resumen

El desarrollo urbano crea nuevas áreas destinadas a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y conforme a ello, sustituye zonas naturales por zonas impermeables, limitando procesos del ciclo hidrológico del agua, consecuencia de ello, produce mayores volúmenes de escorrentía superficial y al estar en contacto con la urbe, requiere indispensablemente ser evacuada por redes de drenaje de forma artificial y, en muchos casos, ésta se ve incapaz de operar correctamente. En el presente trabajo, se analiza el comportamiento hidráulico de la red de drenaje pluvial, en el sector de la Universidad del Azuay, ante implementar sistemas urbanos de drenaje sostenible. Para ello, se elaboró un modelo hidrológico – hidráulico en el software SWMM 5.2. Posteriormente, se implementan medidas de rehabilitación en tres escenarios diferentes, partiendo de un escenario 0, donde, se evidencia la incapacidad de la red ante una lluvia de diseño con un periodo de retorno de 10 años. En el escenario 1, se incorpora hasta tres barriles de lluvia, por cada vivienda. En el escenario 2, se propone celdas de bioretención en los márgenes de las vías. Finalmente, como escenario 3 se adicionan pavimentos permeables en patios y parqueaderos en toda la zona de estudio. Los resultados se enfatizan en los colectores principales de la avenida 24 de Mayo, que se muestran incapaces de evacuar la lluvia de diseño. Los tres sistemas propuestos, trabajando en paralelo reducen un 61% el pico de escorrentía superficial, beneficiando a los colectores principales a cumplir criterios de operatividad hidráulica según normativa.

Palabras clave: drenaje sostenible, celdas, pavimentos permeables, lluvia



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Urban development creates new areas intended to improve the quality of life of citizens and, accordingly, replaces natural areas with impermeable areas, limiting processes of the hydrological cycle of water, as a consequence, it produces greater volumes of surface runoff and, being in contact with the city, it necessarily requires being evacuated through drainage networks artificially and, in many cases, it is unable to operate correctly. In the present work, the hydraulic behavior of the storm drainage network is analyzed, in the sector of the University of Azuay, before implementing sustainable urban drainage systems. For this, a hydrological-hydraulic model was developed in the SWMM 5.2 software. Subsequently, rehabilitation measures are implemented in three different scenarios, starting from a scenario 0, where the inability of the network is evident in the event of a design rain with a return period of 10 years. In scenario 1, up to three rain barrels are incorporated for each home. In scenario 2, bioretention cells are proposed on the edges of the roads. Finally, as scenario 3, permeable pavements are added in patios and parking lots throughout the study area. The results are emphasized in the main collectors of 24 de Mayo Avenue, which are shown to be incapable of evacuating the design rain. The three proposed systems, working in parallel, reduce the peak surface runoff by 61%, benefiting the main collectors to meet hydraulic operability criteria according to regulations.

Keywords: sustainable drainage, cells, permeable pavements, rain



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Índice de contenido.....	4
Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.....	12
Dedicatoria.....	13
Agradecimientos.....	14
1. Introducción.....	15
1.1 Antecedentes y Justificación.....	15
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo general.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Alcance y limitaciones.....	17
1.4 Estado del arte.....	18
2. Marco teórico.....	22
2.1 El drenaje urbano.....	22
2.1.1 Efectos de la Urbanización.....	22
2.2 Componentes de la red de drenaje.....	22
2.2.1 Estructuras de captación.....	23
2.2.2 Estructuras de conducción.....	24
2.2.3 Estructuras de inspección y conexión.....	26
2.2.4 Estructuras de regulación y alivio.....	27
2.3 Sistemas de alcantarillado.....	30
2.3.1 Alcantarillado separado.....	30
2.3.2 Alcantarillado combinado.....	31
2.3.3 Alcantarillado mixto.....	31
2.4 Contribuciones de aguas residuales.....	32
2.4.1 Caudal medio diario doméstico <i>QMD</i>	32
2.4.2 Caudal Máximo Horario <i>QMH</i>	34
2.4.3 Caudal por infiltraciones <i>QInf</i>	35
2.4.4 Caudal por conexiones erradas <i>QErradas</i>	36
2.5 Contribuciones de aguas pluviales.....	36
2.5.1 Lluvia histórica registrada.....	36

2.5.2	Serie temporal de lluvias	36
2.5.3	Lluvias de diseño	37
2.5.4	Lluvias de diseño a partir de curva IDF.....	37
2.5.5	Perdidas por infiltración	40
2.5.6	Tiempo de concentración	43
2.5.7	Comportamiento hidráulico en las redes de drenaje	44
2.6	Drenaje Urbano Sostenible	47
2.6.1	Beneficios de emplear SUDS.....	50
2.6.2	Tipologías	52
2.6.3	Modelo SWMM 5.2	59
3.	Metodología	67
3.1	Diagrama de flujo	67
3.2	Recopilación de datos.....	67
3.2.1	Zona de estudio	67
3.2.2	Topografía	68
3.2.3	Red de alcantarillado.....	69
3.2.4	Información meteorológica local	70
3.3	Procesamiento de datos	72
3.3.1	Subcuencas de aporte.....	72
3.3.2	Pendientes.....	74
3.3.3	Clasificación de superficies permeables e impermeables.....	74
3.3.4	Coeficientes de rugosidad.....	76
3.3.5	Almacenamiento en depresión.....	76
3.3.6	Profundidad de infiltración.....	77
3.3.7	Caudal de aporte de aguas residuales	77
3.3.8	Lluvia de diseño $T_r = 10$ años	79
3.4	Modelación en SWMM 5.2.....	81
3.4.1	Subcuencas (Subcatchment)	81
3.4.2	Pozos de registro (Junction Node).....	83
3.4.3	Tuberías (Conduit link)	85
3.4.4	Pluviógrafo (Rain Gage).....	87
3.4.5	Opciones de simulación	88
3.5	Validación de la red de drenaje con eventos extremos registrados	90
3.5.1	Evento 10 de marzo de 2017	90
3.5.2	Evento 25 de enero de 2020.....	92

3.6	Implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).....	93
3.6.1	Escenario 0.....	93
3.6.2	Escenario 1 (Barriles de lluvia).....	95
3.6.3	Escenario 2 (Celdas de bioretención).....	102
3.6.4	Escenario 3 (Pavimentos permeables).....	109
4.	Análisis de resultados.....	118
4.1	Análisis del comportamiento hidráulico en la red de drenaje.....	118
4.1.1	Escenario 0.....	118
4.1.2	Escenario 1 (Barriles de lluvia).....	119
4.1.3	Escenario 2 (Celdas de bioretención).....	120
4.1.4	Escenario 3 (Pavimentos permeables).....	121
4.2	Hidrograma de escorrentía superficial de escenario evaluados.....	122
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	124
6.	Referencias.....	126
7.	Anexos.....	129
7.1	Anexo A. Discretización de subcuencas.....	129
7.2	Anexo B. Sistemas urbanos de drenaje sostenible.....	133
7.3	Anexo C. Ajustes de parámetros por implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible.....	134
7.4	Anexo D. Resultados de los escenarios modelados.....	136
7.5	Anexo E. Mapa de implementación ubicación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en zona de estudio.....	139

Índice de figuras

Figura 1. Inundaciones en el sector del parque del Paraíso. Fuente: (EXTRA.EC, 2018) ..	19
Figura 2. Inundaciones en el sector de la Feria Libre. Fuente: (CCIOnline, 2021).....	19
Figura 3. Gran acumulación de agua en el paso desnivel del redondel Eloy Alfaro. Fuente: (EComercio, 2022).....	20
Figura 4. Inundaciones en la calle Edwin Sacoto y El Batán sector de la Feria Libre. Fuente: (EIUniverso, 2023)	20
Figura 5. Inundaciones en la calle Edwin Sacoto y El Batán. Fuente (EIMercurio, 2023)	21
Figura 6. Impactos del desarrollo urbano en el ciclo del agua. Fuente: (Butler & Davies, 2018)	22
Figura 7. Rejillas de calzada. Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).....	23
Figura 8. Tipo de sumideros. Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).....	24
Figura 9. Tubos de hormigón. Fuente: (PA, 2020).....	25
Figura 10. Tubería de PVC. Fuente: (Plastigama, 2023).....	25
Figura 11. Tubería de hierro dúctil. Fuente: (EATHISA, 2018).....	25
Figura 12. Vista en planta de pozo de inspección sin cambio de dirección, que conecta dos tramos perpendiculares. Fuente: (López Cualla, 1995).....	26
Figura 13. Vista en alzado de pozo de inspección. Fuente: (López Cualla, 1995)	26
Figura 14. Pozo de caída. Fuente: (López Cualla, 1995)	27
Figura 15. Aliviadero lateral. Fuente: (Arocha, 1983)	27
Figura 16. Aliviadero de salto. Fuente: (Arocha, 1983)	28
Figura 17. Sifón invertido. Fuente: (Butler & Davies, 2018).....	28
Figura 18. (a) tanque de retención en línea con el sistema de alcantarillado, (b) tanque de retención fuera de la línea del sistema. Fuente: (Butler & Davies, 2018)	29
Figura 19. Estación de bombeo. Fuente: (Butler & Davies, 2018)	29
Figura 20. Esquema del sistema de alcantarillado separado. Fuente:(Butler & Davies, 2018)	30
Figura 21. Esquema del sistema de alcantarillado combinado. Fuente:(Butler & Davies, 2018).....	31
Figura 22. Contribuciones de aguas residuales. Fuente: (Butler & Davies, 2018).....	32
Figura 23. Curva Intensidad - Duración – Frecuencia tipo. Fuente: (Gómez, 2007)	38
Figura 24. Tormenta de proyecto con lluvia constante. Fuente: (Gómez, 2007)	38
Figura 25. Tormenta triangular. Fuente: (Chow et al., 1988).....	39
Figura 26. Método de los boques alternados. Fuente: (Chow et al., 1988)	40
Figura 27. Tabla de valores para estimar propiedades según la clase del suelo. Fuente: (Gómez, 2007).....	42

Figura 28. (a) Flujo en tubería parcialmente llena sin sobrecargar. (b) Flujo en tubería con sobrecarga. Fuente: (Butler & Davies, 2018).....	45
Figura 29. Área natural sin desarrollo urbano. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015).....	49
Figura 30. Área impermeable producto del desarrollo urbano. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015).....	49
Figura 31. Aplicación de SUDS en diferentes lugares de la urbe. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015).....	50
Figura 32. Cuatro pilares del diseño de SUDS. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015).....	50
Figura 33. Hidrograma de escorrentía. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015).....	51
Figura 34. Centro de convenciones en Vancouver - Canadá, inaugurado en 2009. Fuente: (Santamaría, 2016).....	53
Figura 35. Pozo de infiltración rodeado de relleno granular. Fuente: (Quiroz & Becerra, 2018).....	54
Figura 36. Pozo de infiltración con elemento modular. Fuente: (Abellán, 2016b).....	54
Figura 37. Zanjas de infiltración. Fuente: (Abellán, 2016c).....	55
Figura 38. Depósito de retención. Fuente: (Abellán, 2016a).....	55
Figura 39. Sistema de bioretención ubicado en estacionamientos. Fuente: (Agencia Iberoamericana para la difusión de la ciencia y la tecnología, 2016).....	56
Figura 40. Pavimento permeable mediante asfalto poroso. Fuente: (AsfaltosUnico, 2018).....	57
Figura 41. Pavimento permeable mediante bloques modulares. Fuente: (EXPOCIHAC, 2023).....	57
Figura 42. Sistema de drenaje de autopista mediante cuenta verde. Fuente: (Navarro, 2018).....	58
Figura 43. Uso de barriles de lluvia en serie a nivel residencial. Fuente: (Ryan, 2023).....	59
Figura 44. Modelo conceptual de SWMM en un sistema de drenaje. Fuente: (L. A. Rossman & Huber, 2016).....	60
Figura 45. Esquema de reservorio no lineal en la modelización de la subcuenca (izquierda) y conceptualización de la subcuenca (derecha). Fuente: (L. A. Rossman & Huber, 2016).....	60
Figura 46. Ajuste de los parámetros de porcentaje de área impermeable y ancho después de ubicar un SUDS (LIDs) en una subcuenca. Fuente: (L. Rossman, 2015).....	63
Figura 47. Esquema de la modelización de las celdas de bio-retención en SWMM.....	63
Figura 48. Esquema de la modelización de jardines de lluvia en SWMM.....	64
Figura 49. Esquema de la modelización de techos verdes en SWMM.....	64
Figura 50. Esquema de la modelización de zanjas de infiltración en SWMM.....	64
Figura 51. Esquema de la modelización de los pavimentos permeables en SWMM.....	65
Figura 52. Esquema de la modelización de los depósitos de lluvia en SWMM.....	65
Figura 53. Esquema de la modelización de desconexión de bajantes en SWMM.....	66

Figura 54. Esquema de la modelización de cunetas verdes en SWMM	66
Figura 55. Diagrama de flujo de metodología empleada	67
Figura 56. Ubicación de zona de estudio. Fuente: Imagen satelital de Google maps	68
Figura 57. Topografía de la zona de estudio. Fuente: (Elaboración propia)	69
Figura 58. Red de alcantarillado de la zona de estudio. Fuente: ETAPA-EP	70
Figura 59. Hietograma de evento 10 de marzo de 2017. Fuente: Estación Ucubamba - ETAPA EP.....	71
Figura 60. Hietograma de evento 25 de enero de 2020. Fuente: Estación Ucubamba - ETAPA EP.....	72
Figura 61. Esquema de proceso de escurrimiento hacia un pozo de registro. Fuente: (Gómez, 2007).....	73
Figura 62. Mapa de discretización de subcuencas de aporte. Fuente: (Elaboración propia)	73
Figura 63. Mapa de pendientes de la zona de estudio. Fuente: (Elaboración propia).....	74
Figura 64. Clasificación de superficies de la zona de estudio	75
Figura 65. Mapa de clasificación de superficies permeables e impermeables de la zona de estudio. Fuente: (Elaboración propia)	75
Figura 66. Hietograma de proyecto obtenido por el método de Bloques Alternados. Fuente: (Elaboración propia).....	80
Figura 67. Ventana del objeto subcuena en SWMM 5.2.....	81
Figura 68. División de subcuencas en SWMM5.2	82
Figura 69. Ventana del objeto Junction.....	83
Figura 70. Ventana para adicionar caudales de aguas residuales en SWMM 5.2.....	84
Figura 71. Esquema de Invert Elev	84
Figura 72. Esquema de Max. Depth.....	84
Figura 73. Ventana del objeto Conduit.....	85
Figura 74. Inlet Node (node 1) – Outlet Node (node 2)	85
Figura 75. Esquema de la propiedad diámetro (Depth).....	86
Figura 76. Esquema de la longitud de la tubería	86
Figura 77. Esquema de la rugosidad que presenta el conducto	86
Figura 78. Esquema de alturas de salidas y llegadas de la tubería en los pozos de registro.	87
Figura 79. Ventana del objeto Pluviógrafo	87
Figura 80. Opciones de cálculo en el modelo	88
Figura 81. Configuración de fechas y horas de simulación	89
Figura 82. Configuración TimeSteps.....	89
Figura 83. Opciones de cálculo por el método de la Onda Dinámica en SWMM5.2	90

Figura 84. Representación de los colectores en carga y nodos inundados - Evento 10 de marzo de 2017 en SWMM 5.2	91
Figura 85. Vista de perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo - Evento 10 de marzo de 2017	91
Figura 86. Representación de los colectores en carga y nodos inundados - Evento 25 de enero de 2020 en SWMM 5.2.....	92
Figura 87. Vista de Perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo - - Evento 25 de enero de 2020	92
Figura 88. Representación de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en la zona de estudio (35 minutos después del inicio de la tormenta).....	94
Figura 89. Vista de perfil de colectores de la Av. 24 de Mayo, en el momento más desfavorable luego del inicio de la tormenta.....	94
Figura 90. Barril de lluvia propuesto. Fuente:(Made-in-china, 2023).....	95
Figura 91. Modo de uso del barril de lluvia en las viviendas. Fuente: (Elaboración propia)	96
Figura 92. Unidad de LID Controls en SWMM5.2.....	96
Figura 93. Ventana LID Control Editor	97
Figura 94. Configuración del barril de lluvia	97
Figura 95. Configuración del parámetro de drenaje para el barril	98
Figura 96. Propiedades del objeto subcuenca.....	98
Figura 97. Ventana LID Controls for Subcatchment	99
Figura 98. Ventana LID Usage Editor	99
Figura 99. Representación de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en la zona de estudio – Escenario 1 (35 minutos después del inicio de la tormenta).....	101
Figura 100. Vista de perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo – Escenario 1 (35 minutos después del inicio de la tormenta)	102
Figura 101. Unidad de celda plástica con sus dimensiones comerciales. Fuente (Lovado, 2013).....	102
Figura 102. Celda de bio-retención a implantar como Sistema de Urbano de Drenaje Sostenible. Fuente: (Elaboración propia)	103
Figura 103. Configuración de la pestaña <i>Surface</i> desde la opción <i>LID Control Edit</i>	104
Figura 104. Propiedades de la capa suelo para diferentes tipos de suelo. Fuente (Valbuena, 2016).....	105
Figura 105. Configuración de la pestaña <i>Soil</i> desde la opción <i>LID Control Edit</i>	105
Figura 106. Configuración de la pestaña <i>Storage</i> desde la opción <i>LID Control Edit</i>	106
Figura 107. Configuración de la pestaña <i>Drain</i> desde la opción <i>LID Control Edit</i>	106
Figura 108. Adición del elemento LID (celdas de bio-retención) desde la opción <i>LID Control Subcatchment</i>	107

Figura 109. Configuración del elemento LID (celdas de bio-retención) desde la opción LID Usage Editor para la subcuenca S-11.....	107
Figura 110. Representación de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en la zona de estudio – Escenario 2 (35 minutos después del inicio de la tormenta).....	108
Figura 111. Vista de perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo – Escenario 2 (35 minutos después del inicio de la tormenta).....	109
Figura 112. Pavimento permeable de bloque modular. Fuente: (IdealBlock, n.d.)	109
Figura 113. Esquema de pavimento permeable a emplear en patios y parqueaderos. Fuente: (Elaboración propia)	110
Figura 114. Esquema de ubicación de pavimento permeable en el parqueadero frente a la Universidad del Azuay y celda de bio-retención. Fuente: (Elaboración propia).....	110
Figura 115. Esquema de ubicación de pavimento permeable y celda de bio-retención en la Av. 24 de Mayo. Fuente: (Elaboración propia).....	111
Figura 116. Configuración de la capa Surface desde LID Control Editor.....	112
Figura 117. Configuración de la capa <i>Pavement</i> desde LID Control Editor.....	113
Figura 118. Configuración de la capa <i>Soil</i> desde LID Control Editor	113
Figura 119. Configuración de la capa <i>Storage</i> desde LID Control Editor.....	114
Figura 120. Configuración de la capa <i>Drain</i> desde LID Control Editor.....	114
Figura 121. Adición del elemento LID (pavimentos permeables) desde la opción LID Control Subcatchment.....	115
Figura 122. Configuración del elemento LID (pavimentos permeables) desde la opción LID Usage Editor para la subcuenca S-11.....	115
Figura 123. Representación de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en la zona de estudio – Escenario 3 (35 minutos después del inicio de la tormenta).....	116
Figura 124. Vista de perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo – Escenario 3 (35 minutos después del inicio de la tormenta).....	117
Figura 125. Perfil de elevación de la lámina de agua en el colector principal – Escenario 0.	119
Figura 126. Perfil de elevación de la lámina de agua en el colector principal – Escenario 1.	120
Figura 127. Perfil de elevación de la lámina de agua en el colector principal – Escenario 2.	121
Figura 128. Perfil de elevación de la lámina de agua en el colector principal – Escenario 3.	122
Figura 129. Comparación de caudales pico entre escenarios evaluados.....	123

Índice de tablas

Tabla 1. Coeficientes de retorno. Fuente: (EMAAP-Q, 2009).....	33
Tabla 2. Contribución comercial. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)	34
Tabla 3. Contribución institucional. Fuente: (EMAAP-Q, 2009).....	34
Tabla 4. Coeficientes de mayoración. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)	35
Tabla 5. Valores para aportes por infiltración en función del área de la red. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)	36
Tabla 6. Aportes máximos de caudales por conexiones erradas. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)	36
Tabla 7. Velocidades máximas de acuerdo al tipo de material de tubería. Fuente: EMAAP-Q	46
Tabla 8. Evento 10 marzo de 2017. Fuente: Estación Ucubamba - ETAPA EP	71
Tabla 9. Evento 25 de enero de 2020. Fuente: Estación Ucubamba - ETAPA EP.....	72
Tabla 10. Factores de rugosidad considerados en SWMM. Fuente: (L. Rossman, 2015) ...	76
Tabla 11. Almacenamiento en depresiones (valores en mm). Fuente (Gómez, 2007).....	77
Tabla 12. Valores empleados para pérdidas por infiltración. Fuente (L. Rossman, 2015)	77
Tabla 13. Valores adoptados para contribuciones de aguas residuales	79
Tabla 14. Lluvia de diseño $T_r = 10$ años – duración 60 minutos. Fuente: (INAMHI, 2009) ...	80
Tabla 15. Caudales, velocidades y capacidades máximas obtenidas - Escenario 0.....	118
Tabla 16. Caudales, velocidades y capacidades máximas obtenidas - Escenario 1.....	120
Tabla 17. Caudales, velocidades y capacidades máximas obtenidas - Escenario 2.....	121
Tabla 18. Caudales, velocidades y capacidades máximas obtenidas - Escenario 3.....	122
Tabla 19. Caudales pico de escorrentía superficial para cada escenario y porcentajes de reducción respecto al Escenario 0.	123

Dedicatoria

Este trabajo dedico a todos mis seres queridos que me han apoyado para llegar a cumplir un objetivo más en mi vida, especialmente a mis padres, que a su manera supieron forjarme a cumplir mis metas y anhelos.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios, por otorgarme todo lo que he tenido y lo tengo hoy.

De igual manera expreso mi infinita gratitud a la Ing. María Mercedes Ojeda, excelente persona, gracias por su colaboración y tiempo en el desarrollo de este trabajo.

Quiero también agradecer al Ing. Esteban Sánchez, excelente docente que tiene la Facultad de Ingeniería, gracias por su apoyo y tiempo dispuesto para el desarrollo de este trabajo.

1. Introducción

1.1 Antecedentes y Justificación

El fenómeno migratorio, los asentamientos poblacionales en zonas ya consolidadas y conjuntamente con un déficit en el control de uso del suelo, ha provocado un incremento urbanístico de manera acelerada, y consigo, mayor demanda de servicios y recursos para la ciudadanía. Producto de la necesidad del desarrollo humano que, evidentemente requiere de su espacio superficial, incrementa espacios impermeables, existe pérdida de cobertura vegetal que impiden la infiltración natural de las aguas lluvia. Además, la presencia de espacios impermeables reduce el tiempo de concentración de la lluvia de una cuenca de aporte, afectando en la red de drenaje por los grandes volúmenes de escorrentía que debe evacuar. Es evidente que la impermeabilización de una cuenca modifica su respuesta hidrológica frente a determinadas precipitaciones. No obstante, estas modificaciones en las superficies de suelo también generan daños en la infraestructura del área comprendida, por las inundaciones que se generan producto de la pérdida de capacidad de los elementos de captación de aguas lluvias, que se vuelven obsoletos en los eventos de gran magnitud. Sin embargo, haciendo frente a los diversos problemas que acarrea la urbanización, y las consecuencias que presenta la impermeabilización de la superficie, en la actualidad se pretende replicar el ciclo hidrológico del agua, con sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), que cumplen principios económicos, ecológicos y sociales, con la intención de disminuir los impactos del desarrollo urbano sobre la cantidad y calidad de las aguas pluviales.

El fenómeno del desarrollo urbano conlleva un continuo aumento de las superficies impermeables, en la actualidad más del 50% de la población mundial vive en zonas urbanas, habiéndose incrementado en más de un 80% en los últimos 20 años (Rodríguez, 2013). Lo cual está generando una grave alteración del ciclo natural del agua, aumentando los problemas relacionados con el drenaje y la gestión del agua lluvia. Maturana (2007) sostiene que, en zonas de urbanización consolidada el 90% de las precipitaciones pueden transformarse en escorrentía superficial. Es decir, mayor volumen de agua pluvial a ser captada y evacuada lo más pronto posible a un curso de agua natural, esto demanda de mayor eficiencia en los sistemas de captación y transporte, que en muchos de los casos ante eventos fuertes, estos sistemas llegan a colapsar, provocando aguas abajo respuestas imprevisibles como las inundaciones (Cordero et al., 2015). Por otra parte, el lavado de las superficies urbanas aporta altas cargas de contaminación a la escorrentía (Moreira Romero I, 2022), produciendo importantes impactos en los medios receptores por la contaminación difusa, contaminantes como hidrocarburos, fertilizantes, materia orgánica y materia inerte afecta la calidad de agua del medio receptor.

Desde la década de los años 80, diversos países del mundo han propuesto un sistema de drenaje modernizado para mejorar las deficiencias del sistema de drenaje urbano tradicional. Surge una nueva forma de tratar el agua pluvial, con sistemas sostenibles que atenúan el hidrograma unitario ante los picos de crecida producto de la impermeabilización urbana, estos sistemas captan, tratan, infiltran o almacenan el agua. Permitiendo minimizar los impactos del desarrollo en cantidad y calidad de la escorrentía (Woods Ballard et al., 2007), es decir, replicar lo más fielmente posible, el drenaje natural de un sitio previo al desarrollo urbano. Moreira (2022) señala que, Brasil y Colombia son los países de la región con mejor desempeño de proyectos de implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. En Ecuador, la filosofía de drenaje sostenible se encuentra en desarrollo, diferentes ciudades han optado por implementar medidas estructurales y no estructurales en el drenaje pluvial. Sin embargo, falta más por descubrir e implementar técnicas que permitan garantizar el adecuado desarrollo, fenómeno que llega a provocar estragos a consecuencia del proceso urbanizador en la hidrología local.

Existen numerosas experiencias a nivel internacional la implantación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS por sus siglas), grandes urbes están afrontando los nuevos retos del drenaje urbano en este marco y están creando la tendencia para el futuro. Un ejemplo de éxito en la implantación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible es la ciudad de Nueva York que ha puesto en marcha proyectos y programas relacionados con la infraestructura verde “NYC Green Infrastructure Plan”, convirtiéndose en líder mundial en esta disciplina. Philadelphia desarrolló el plan “Green City, Clean Waters”, y más ciudades han invertido por la gestión de las aguas lluvias como Wuhan que han adoptado recientemente las estrategias denominadas “Ciudad Esponja”. En Cuenca-Ecuador, implementar modelos y técnicas de drenaje urbano sostenible es una gran opción para mitigar los estragos causados por las fuertes precipitaciones que se dan a nivel local, las mismas que provocan inundaciones, daños en la infraestructura e inseguridad al ciudadano. Por ello, en el presente trabajo es analizar el comportamiento hidráulico en la red de drenaje, al proponer una rehabilitación con sistemas urbanos de drenaje sostenible en el sector de la Universidad del Azuay, área amplia y urbanizada en su mayoría, siendo la mayor parte de la superficie impermeable. Este sector presenta problemas de inundaciones en la parte más baja que comprende la Av. 24 de Mayo, producto de la acumulación de grandes volúmenes de agua de la escorrentía superficial, donde, los elementos de captación y evacuación de aguas pluviales pierden su capacidad y afectan en las zonas bajas del sector con el estancamiento de agua en las vías.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento hidráulico de la red de drenaje implementando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el sector de la Universidad del Azuay - Cuenca

1.2.2 Objetivos específicos

- Recolectar datos como; topografía, imagen satelital, precipitaciones registradas e infraestructura del sistema de alcantarillado de la zona de estudio.
- Elaborar un modelo hidrológico-hidráulico de la zona de estudio, mediante el uso de un programa: Storm Water Management Modelling –(SWMM 5.2).
- Implementar medidas de rehabilitación, empleando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, comparando respuestas hidráulicas en la red de drenaje actual y con la implementación de SUDS, como respuesta para una lluvia de diseño con periodo de retorno de 10 años y 60 minutos de duración, de tal forma de que, se cumplan criterios de operatividad hidráulica.

1.3 Alcance y limitaciones.

El sistema de alcantarillado de la zona de estudio colapsa ante precipitaciones de gran intensidad. Gran parte de la superficie de esta zona posee una elevada pendiente y las descargas en su totalidad se conectan a los colectores de la avenida 24 de Mayo. Mediante la herramienta hidroinformática denominada SWMM en su versión 5.2, se caracteriza y se modela la zona de estudio con las condiciones actuales. Como lluvia base se tiene una lluvia de diseño para un periodo de retorno de 10 años, posteriormente se implementan tres escenarios con Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, para comparar la respuesta hidráulica del sistema de alcantarillado existente.

El programa Storm Water Management Modelling (SWMM 5.2), permite realizar el análisis hidráulico de transporte por distintos métodos como el flujo uniforme, la onda cinemática o la modelación completa por onda dinámica. Para ello, es necesario discretizar la cuenca urbana, en subcuencas de aporte a la red, recopilar precipitaciones que han provocado estragos a nivel local, ubicación de los nodos de descarga, conductos y parámetros hidrológicos que simulen la realidad de la zona de estudio. Una vez validado el modelo hidrológico para la cuenca objeto de estudio, lo siguiente es simular una lluvia de diseño, la misma que permite analizar el comportamiento hidráulico de la red de drenaje, donde se pretende evidenciar las zonas en donde colapsa la red de alcantarillado y, establecer medidas de rehabilitación empleando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

El desarrollo del presente trabajo se limita en estudiar únicamente el comportamiento hidráulico en la red de drenaje, con énfasis en los colectores principales que se ubican en la avenida 24 de mayo, y su respuesta ante la implantación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible como medidas de rehabilitación, no se determina la eficiencia individual para cada Sistema Urbano de Drenaje Sostenible sino, únicamente en el beneficio directo en la red de drenaje evaluada. Por otra parte, no se considera el efecto del desbordamiento del río Yanuncay en el proceso de simulación y resultados obtenidos.

1.4 Estado del arte

En la ciudad de Cuenca en el año 2018 la población en el área urbana era de 387266 habitantes. Según los datos censales de población, la proyección de crecimiento para el año 2033 en el área urbana cantonal es de 517211 habitantes (PUGS, 2022). De estas proyecciones el organismo municipal toma en consideración para el incremento de áreas de suelo en expansión urbana. Estos valores permiten identificar la demanda de servicios básicos como abastecimiento de agua, servicios de alcantarillado, transporte público etc. En el año 2022, el porcentaje de suelo urbano consolidado representaba el 32%, es decir, áreas ocupadas por viviendas unifamiliares, viviendas multifamiliares, comercios e industrias, completamente dotadas de todos los servicios básicos, equipamiento e infraestructuras necesarias. Estos valores permiten conocer el nivel de impermeabilidad que cuenta el cantón Cuenca y el aumento de áreas impermeables que tendrá en años posteriores. Adicionalmente, la gran demanda en la eficiencia de los servicios de recolección y transporte de aguas servidas y aguas pluviales, que, aumentará en los próximos años.

En diferentes lugares de la ciudad se han presentado disturbios ante el drenaje de aguas pluviales en las épocas húmedas del año, si bien es cierto, no se pueden establecer fechas marcadas de eventos con fuertes precipitaciones. Sin embargo, se pueden prevenir problemas con medidas de mitigación en zonas que han sido vulnerables ante la presencia de eventos de gran magnitud. Uno de los problemas más evidentes ante la deficiencia de los elementos de recolección y transporte de aguas pluviales son las inundaciones, que no solamente provoca daños en la infraestructura local, sino que también genera zozobra en la ciudadanía. Eventos que han marcado grandes problemas por deficiencia de los elementos de drenaje urbano se pueden describir a continuación.

El 20 de noviembre del 2018, fuertes lluvias provocaron el colapso de alcantarillas en la avenida 10 de Agosto y Pasaje el Paraíso, anegando completamente las vías y restringiendo el paso vehicular.



Figura 1. Inundaciones en el sector del parque del Paraíso. Fuente: (EXTRA.EC, 2018)

Problema similar se produjo a consecuencias de las fuertes precipitaciones del 29 de noviembre del 2021 en el sector de la Feria Libre.



Figura 2. Inundaciones en el sector de la Feria Libre. Fuente: (CCIONline, 2021)

Otro registro reportado corresponde a la fecha 14 de octubre del 2022, la cual se evidenció grandes acumulaciones de agua producto de las fuertes precipitaciones, que se suscitaron en el noroeste de la ciudad.



Figura 3. Gran acumulación de agua en el paso desnivel del redondel Eloy Alfaro. Fuente: (EiComercio, 2022)

Por otro lado, el 8 de abril del 2023 la acumulación de las precipitaciones llegó a 35 milímetros, provocando inundaciones en varios sectores de Cuenca. Entre los afectados estuvieron sectores como: El Descanso, Feria Libre, Ricaurte, Avenida de la Américas, Chaullabamba y la vía Cuenca – Azogues.



Figura 4. Inundaciones en la calle Edwin Sacoto y El Batán sector de la Feria Libre. Fuente: (EIUniverso, 2023)



Figura 5. Inundaciones en la calle Edwin Sacoto y El Batán. Fuente (ElMercurio, 2023)

Estos problemas se pueden disminuir empleando Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, como en muchas ciudades del mundo han implementado. Lovado (2013) en su trabajo, detalla varias ciudades que han optado por gestionar el agua pluvial mediante diversas técnicas como; en la ciudad de Seattle ubicada en el condado King del estado de Washington, se lleva a cabo un programa de barriles de agua lluvia para reducir el exceso de volumen de escorrentía que se presenta en la localidad. De igual forma, en el condado de Cumberland del estado de Pennsylvania, se implementó un proyecto de barriles de agua lluvia similar al anterior. El proyecto consiste en que cada año, el distrito de conservación del condado de County construye cierto número de barriles de agua lluvia y los distribuye entre los ciudadanos, incentivándolos económicamente mediante reducciones en las tarifas del servicio de agua y saneamiento básico. Por otro lado, en Alemania el techo del estadio Frankfurt remodelado en el 2005, con un área de captación de 25000 m², fue restaurada asegurando que el agua en lugar de evacuar directamente hacia el sistema de drenaje público, drene hacia unidades modulares para almacenar e infiltrar, para ello, se instalaron 9000 unidades modulares de Aquacell, de la empresa Wavin Overseas, para recolectar un volumen total de almacenamiento de 1712 m³. De la misma manera se implementó en el estadio olímpico de Berlín en el año 2003.

A nivel local, el manejo sostenible de la escorrentía superficial urbana mediante sistemas urbanos de drenaje sostenible no se aplica. Al no contar con una normativa o legislación que obligue a la ciudadanía a aplicar su uso, hace que el desarrollo urbanístico genere impacto sustancial en los sistemas de alcantarillado existentes.

2. Marco teórico

2.1 El drenaje urbano

Este concepto surge a partir de la interacción entre la actividad humana y el ciclo natural del agua, obteniendo como resultado aguas residuales y las aguas pluviales a evacuar. Los sistemas de drenaje urbano manejan estos dos tipos de agua con el objetivo de minimizar los problemas causados a la vida humana y al medio ambiente.(Butler & Davies, 2018)

2.1.1 Efectos de la Urbanización

Cuando el agua de lluvia cae sobre una superficie natural, parte del agua vuelve a la atmósfera por evaporación o transpiración de las plantas, una parte se infiltra en la superficie convirtiéndose en agua subterránea y un porcentaje queda en la superficie. (Butler & Davies, 2018). El desarrollo urbano, implica crear una capa impermeable provocando un efecto significativo al ciclo del agua interfiriendo en gran parte los procesos que comprenden el ciclo natural del agua. Procesos como la infiltración, evapotranspiración tienden a limitarse por presencia de zonas densamente urbanizadas, incrementando de esta manera la escorrentía superficial, disminuyendo tiempos de concentración, aumentando el caudal máximo y volúmenes de escorrentía, por consiguiente, incrementa la demanda de infraestructuras de captación, transporte y derivación del agua pluvial.

En la siguiente figura, se muestra a nivel de esquema el aumento de volúmenes de escorrentía superficial y la disminución de volúmenes en los procesos de evapotranspiración e infiltración como consecuencia del proceso urbanizador.

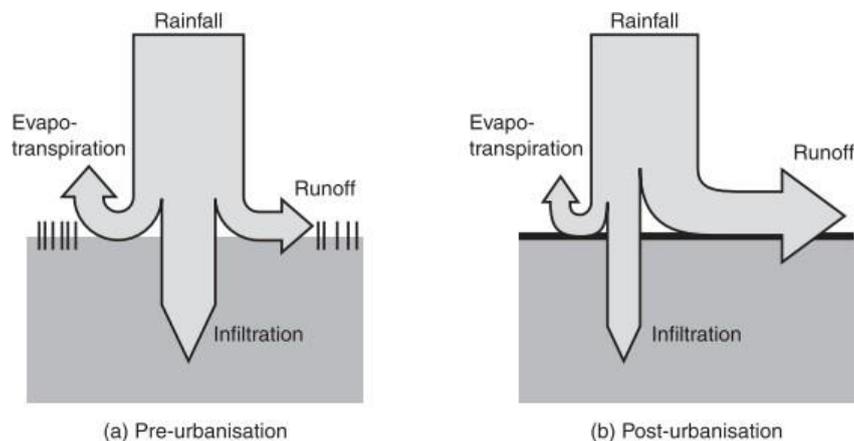


Figura 6. Impactos del desarrollo urbano en el ciclo del agua. Fuente: (Butler & Davies, 2018)

2.2 Componentes de la red de drenaje

La infraestructura de drenaje urbano tiene como objetivo recolectar y transportar las aguas residuales y aguas generadas por la escorrentía superficial. Para ello, requiere un sistema

completamente artificial de drenaje. Es decir, un conjunto de elementos de captación, conducción, inspección, regulación y alivio, en casos especiales el sistema requiere estaciones de bombeo (Duque, 2013).

2.2.1 Estructuras de captación

Su función es recolectar el agua lluvia producto de la escorrentía generada por áreas impermeables. Los sumideros o imbornales están para captar la escorrentía superficial y para captar el agua de las cubiertas están los canales de recolección.

Sumideros: se utilizan para transportar el agua de lluvia que escurre a través de las cunetas de las vías vehiculares o peatonales hacia las alcantarillas pluviales, estas se ubican en forma lateral o transversal al sentido del flujo, su clasificación se divide en sumideros de bordillo, de cuneta y mixto. A ellas se encuentran acopladas piezas fundidas y rejillas separadas de acuerdo al caudal a recoger.

Canaletas: permite captar el agua lluvias especialmente de las cubiertas y drenar hacia el sistema de evacuación residencial y posteriormente al sistema de alcantarillado público.

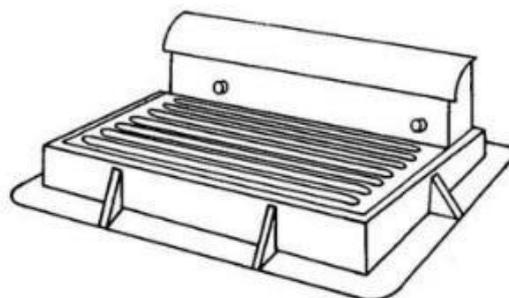


Figura 7. Rejillas de calzada. Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995)

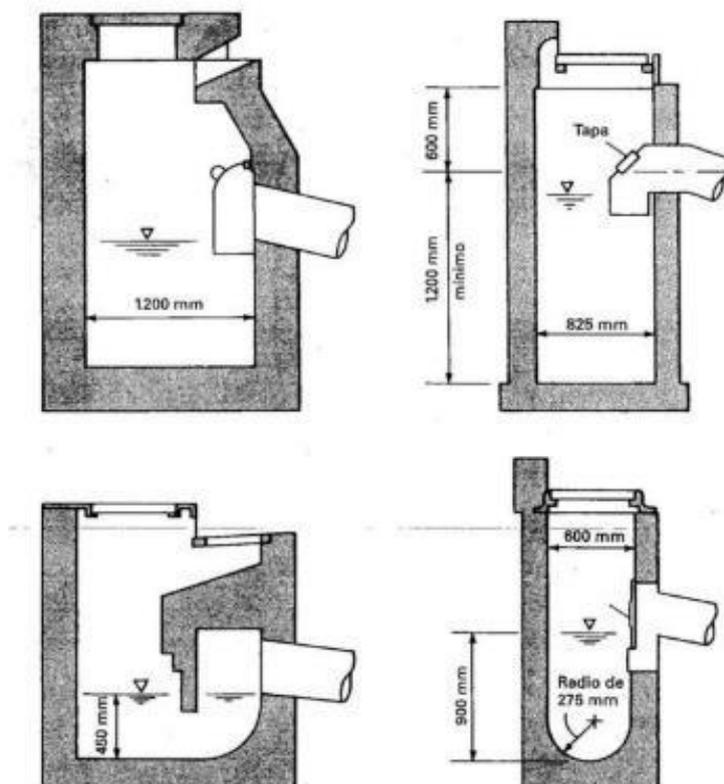


Figura 8. Tipo de sumideros. Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995)

2.2.2 Estructuras de conducción

Conforman el mayor porcentaje de la red de drenaje, se encargan de transportar las aguas residuales y pluviales a lo largo de la red hasta su punto de descarga o tratamiento de acuerdo al tipo de sistema de alcantarillado.

Butler & Davies (2018) afirma, las características físicas más importantes del material de una tubería de alcantarillado son: durabilidad, resistencias a la abrasión, resistencia a la corrosión, impermeabilidad, resistencia a la rotura.

Entre los diferentes tipos de materiales en tuberías para sistemas de alcantarillado se encuentran las más comunes como: tuberías de hormigón simple, hormigón reforzado, hierro dúctil y tuberías de PVC. En las siguientes figuras se presentan los conductos más empleados en un sistema de alcantarillado.



Figura 9. Tubos de hormigón. Fuente: (PA, 2020)



Figura 10. Tubería de PVC. Fuente: (Plastigama, 2023)



Figura 11. Tubería de hierro dúctil. Fuente: (EATHISA, 2018)

2.2.3 Estructuras de inspección y conexión

Corresponden a los pozos de inspección y a los pozos de caída.

Pozos de inspección: Permiten el registro y limpieza, se encuentran cubiertos por una tapa removible, son empleados en: intersecciones, cambios de sección, cambios de pendiente, inicios de tramos, y a ciertos intervalos en distancias largas. Butler & Davies (2018) recomienda ubicar en tramos largos cada 90 m, para asegurar ventilación del alcantarillado.

En las siguientes figuras se ilustra un pozo de registro común con sus respectivas vistas.

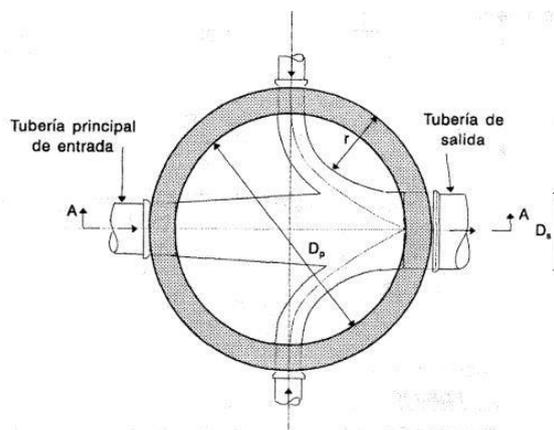


Figura 12. Vista en planta de pozo de inspección sin cambio de dirección, que conecta dos tramos perpendiculares. Fuente: (López Cualla, 1995)

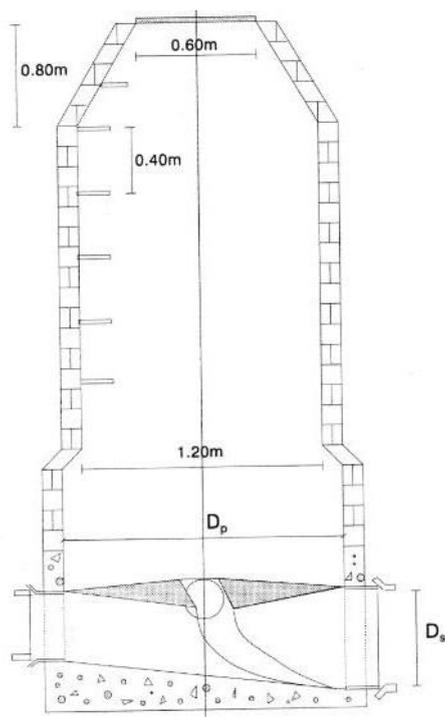


Figura 13. Vista en alzado de pozo de inspección. Fuente: (López Cualla, 1995)

Pozos de caída: Son estructuras destinadas a dirigir el flujo que ingresa al pozo de inspección, con el objetivo de disipar energía almacenada y evitar la erosión de la base del pozo receptor. El requerimiento mínimo para el empleo de pozo de caída es que exista una diferencia mayor a 0.75 m, entre las cotas de la solera de las tuberías concurrentes y la de la salida (López Cualla, 1995).

En la siguiente figura se esquematiza un pozo de caída.

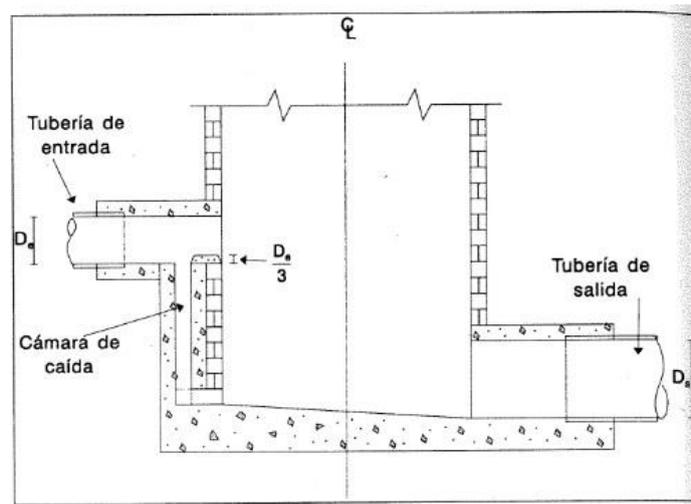


Figura 14. Pozo de caída. Fuente: (López Cualla, 1995)

2.2.4 Estructuras de regulación y alivio

Aliviaderos: Son estructuras que permiten la salida de cierto volumen de agua que viaja por el alcantarillado, cuando se presente un evento extremo de precipitación (Duque, 2013). Estos a su vez pueden ser aliviaderos laterales o de salto.

Los aliviaderos laterales, consiste en una abertura o ventana abierta en un conducto, a fin de permitir la descarga de un exceso de caudal a un canal de alivio, permitiendo que caudales menores continúen hacia el sistema (Arocha, 1983). En la siguiente figura se esquematiza el aliviadero lateral.

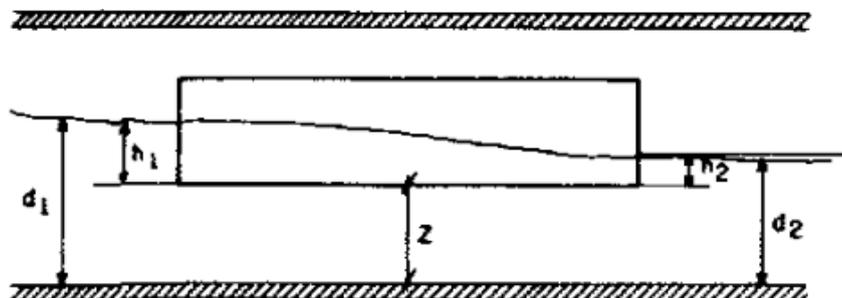


Figura 15. Aliviadero lateral. Fuente: (Arocha, 1983)

El aliviadero de salto, consiste en una estructura a, la cual posee una abertura en la parte inferior que permite captar en su totalidad el chorro, y en incrementos de caudal el remanente es conducido hacia un canal de descarga. (Arocha, 1983).

A continuación, se ilustra el aliviadero de salto.

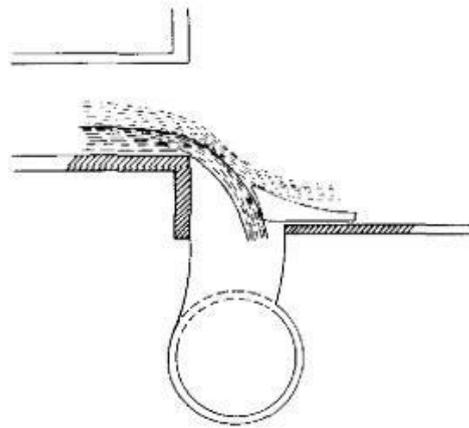


Figura 16. Aliviadero de salto. Fuente: (Arocha, 1983)

Sifones invertidos: Transportan flujos debajo de ríos, canales, caminos, etc. Son necesarios cuando este cruce no se puede realizar mediante un puente. Trabajan a presión de manera que se debe garantizar su autolimpieza, se supone que esto se logrará si la velocidad es superior a 1 m/s, cuanto mayor sea la velocidad, menor será el peligro de sedimentación. En sistemas separados dos tuberías para aguas residuales suelen ser suficiente, en sistemas combinados es recomendable incluir una tercera tubería mucho más grande. (Butler & Davies, 2018)

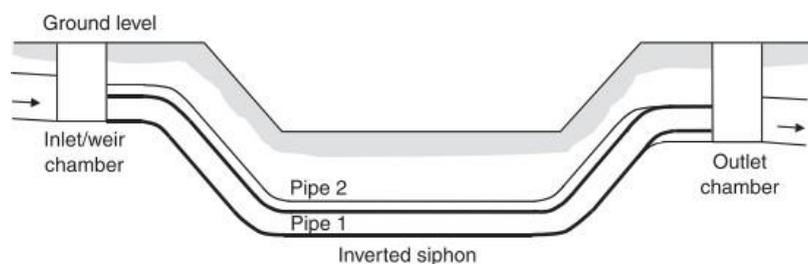


Figura 17. Sifón invertido. Fuente: (Butler & Davies, 2018)

Depósitos de almacenamiento: Permiten limitar las inundaciones disminuyendo el pico de caudal que escurre en el sistema de alcantarillado. En un alcantarillado combinado un sistema de almacenamiento temporal permite retener contaminantes en lugar que se desborden a un curso de agua, se debe considerar que el tiempo de retención no debe de

ser largo debido a la generación de malos olores. En la siguiente figura se esquematiza los tipos de depósitos de retención que se pueden emplear.

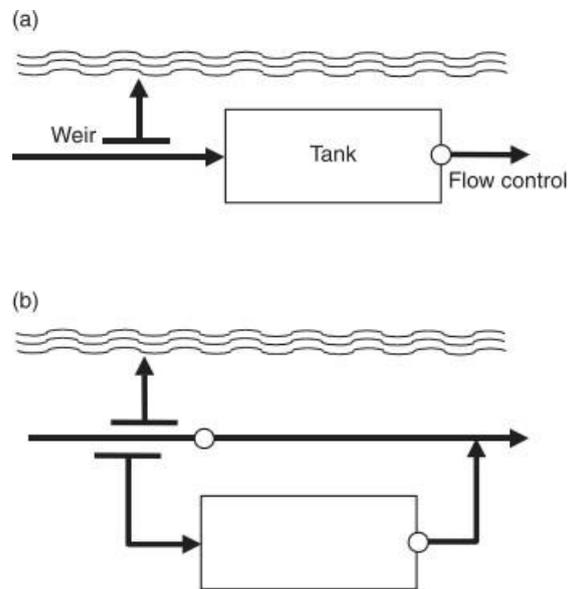


Figura 18. (a) tanque de retención en línea con el sistema de alcantarillado, (b) tanque de retención fuera de la línea del sistema. Fuente: (Butler & Davies, 2018)

Sistema de bombeo: Los componentes de bombeo son necesarios cuando la energía hidráulica en una zona es demasiado baja lo que impide la evacuación de las aguas residuales por gravedad, obligando a drenar mediante un equipo mecánico. A continuación, se ilustra una estación de bombeo simplificada.

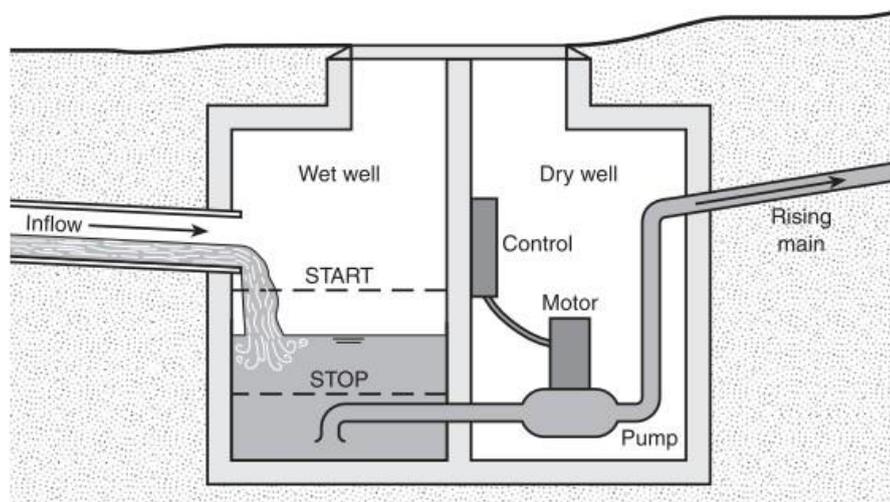


Figura 19. Estación de bombeo. Fuente: (Butler & Davies, 2018)

2.3 Sistemas de alcantarillado

Manejan dos tipos de flujo: aguas residuales y aguas pluviales. Básicamente existen dos tipos de sistemas de alcantarillado: alcantarillado separado y un alcantarillado combinado, sin embargo, en ocasiones puede presentar un tercer sistema como un alcantarillado mixto.

2.3.1 Alcantarillado separado

Se deriva según el tipo de vertido que conduce, puede ser sanitario y pluvial.

Alcantarillado sanitario

Es el sistema encargado de recolectar y transportar exclusivamente aguas residuales domésticas e industriales. Las aguas domésticas, proceden de cocinas, baños, lavabos, sanitarios y lavandería. Se infiere que el drenaje doméstico es inestable, biológicamente degradable o putrescible y capaz de originar olores ofensivos. Además, se encuentran presentes organismos entéricos, que las hacen peligrosas. Mientras tanto las aguas industriales varían en su composición de acuerdo con las operaciones de la industria, algunas relativamente limpias, otras cargadas de materia orgánica, minerales, sustancias corrosivas, venenosas, inflamables o explosivas. (Fair Gordon Maskew et al., 2004)

Alcantarillado pluvial

Es el sistema de evacuación de la escorrentía superficial producida por la lluvia, procedente de lavado sobre tejados, calles y suelos, pueden contener una gran cantidad de sólidos suspendidos en zonas de alta contaminación atmosférica, pueden contener algunos metales pesados y otros elementos químicos. (López Cualla, 1995)

En la siguiente figura se presenta el sistema de alcantarillado separado.

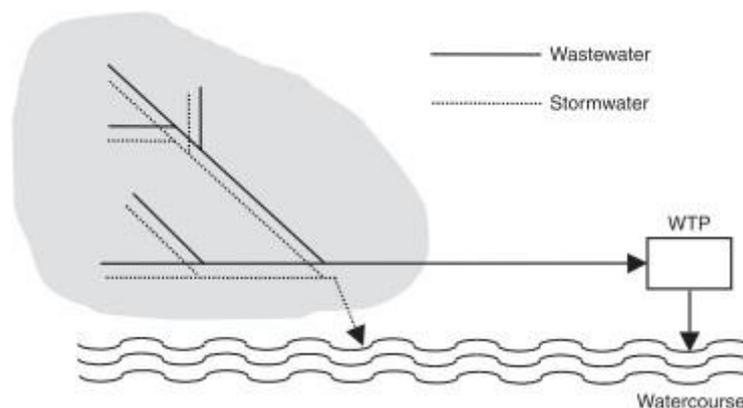


Figura 20. Esquema del sistema de alcantarillado separado. Fuente:(Butler & Davies, 2018)

2.3.2 Alcantarillado combinado

Es el sistema que conduce simultáneamente las aguas residuales y las aguas de lluvia. Las aguas de lluvia exceden, a menudo, a las aguas residuales en 50 ó 100 veces en los sistemas combinados. En consecuencia, la mayoría de los alcantarillados combinados se diseñan para servir primordialmente como drenajes pluviales. (Fair Gordon Maskew et al., 2004)

Económicamente no es viable sobredimensionar la capacidad para este flujo lo largo de toda la longitud del sistema, que, implícitamente transportarían solo una pequeña proporción de la capacidad la mayor parte del tiempo. En la planta de tratamiento también sería inviable manejar grandes capacidades en sus procesos depurativos. La solución es implementar estructuras de derivación (Combined Sewer Overflow CSO) que, durante lluvias medias o intensas desvíen los flujos por encima de cierto nivel fuera del sistema de alcantarillado hacia un curso de agua natural. En la figura siguiente se ilustra el sistema de alcantarillado combinado que, recibe un aporte de aguas pluviales mezcladas con aguas residuales. Parte del flujo se retiene en el sistema de alcantarillado y continua hasta la planta de tratamiento (Wasterwater Treatment Plant WTP) y los excesos son desbordados hacia un curso de agua.

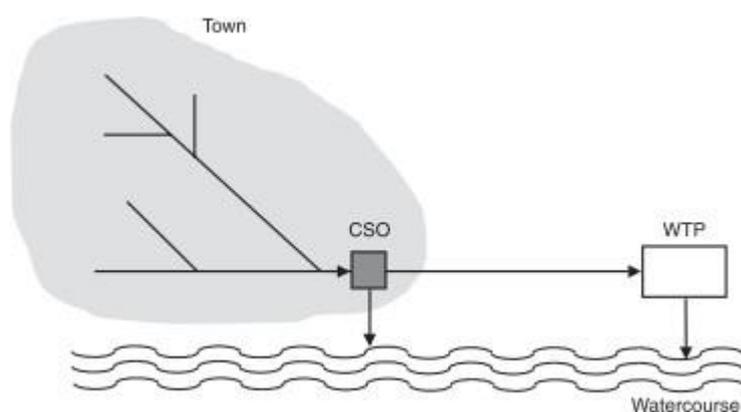


Figura 21. Esquema del sistema de alcantarillado combinado. Fuente:(Butler & Davies, 2018)

2.3.3 Alcantarillado mixto

Son la combinación de un sistema de alcantarillado separado y combinado dentro de una misma área urbana. (SENAGUA, 1992)

2.4 Contribuciones de aguas residuales

Está integrado por aguas residuales domésticas, comerciales, institucionales e industriales. Derivados a partir del consumo de agua potable. Además, se incorporan aportes generados por las precipitaciones que llegan a incrementar los aportes de aguas residuales en el sistema de alcantarillado. En la siguiente figura se presenta el esquema de fuentes que contribuyen al aporte de aguas residuales.

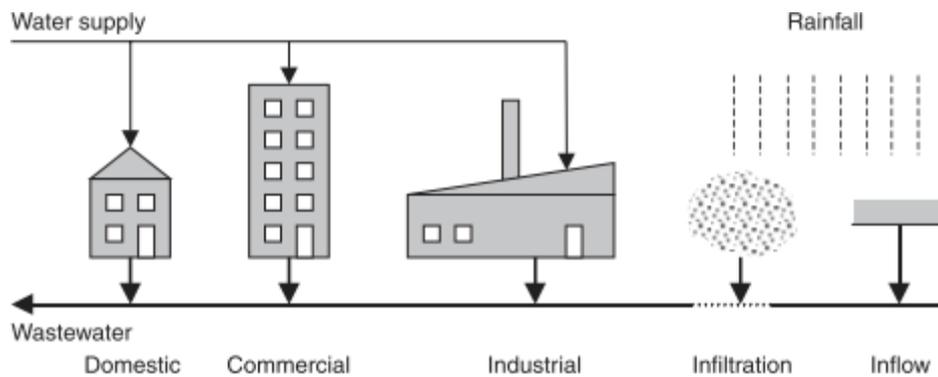


Figura 22. Contribuciones de aguas residuales. Fuente: (Butler & Davies, 2018)

Entonces, los componentes que aportan a las aguas residuales son:

$$Q_{A.R} = Q_{MD} \cdot F + Q_{Inf} + Q_{Erradas}$$

Donde:

$Q_{A.R}$: Caudal de aguas residuales.

Q_{MD} : Caudal medio diario doméstico.

F : Factor de mayoración.

Q_{Inf} : Caudal por infiltración.

$Q_{Erradas}$: Caudal por conexiones erradas.

2.4.1 Caudal medio diario doméstico Q_{MD}

Está compuesto por caudales de tipo residencial, comercial, institucional e industrial, la ecuación queda definida de la siguiente manera.

$$Q_{MD} = Q_{residencial} + Q_{comercial} + Q_{institucional} + Q_{industrial}$$

Caudal residencial ($Q_{residencial}$)

En función de la dotación del servicio de agua potable, la población a ser servida y un factor de retorno que representa la fracción de agua dotada que regresa al sistema de alcantarillado. Entonces, la ecuación queda definida a continuación.

$$Q_{residencial} = \frac{Dotación \left(\frac{l}{hab-día} \right) \cdot Población (hab) \cdot R}{86400} \quad \frac{l}{s}$$

Dotación: Representa el suministro de agua potable por habitante en un día.

Población: Cantidad de habitantes a ser beneficiados del servicio, este valor se puede determinar de forma directa, mediante censos y registros en campo o de forma indirecta por número de predios, conexiones domiciliarias del servicio de agua potable o conexiones al servicio de energía eléctrica.

Coefficiente de retorno R: El porcentaje de agua distribuida que se pierde y no ingresa a las redes de alcantarillado, depende de diversos factores, entre los cuales están: los hábitos y valores de la población, las características de la comunidad, la dotación de agua, y las variaciones del consumo según las estaciones climáticas de la población. (CEPIS, 2005)

La EMAAP-Q, establece valores de acuerdo al nivel de complejidad del sistema, como se presenta en la siguiente tabla.

COEFICIENTES DE RETORNO DE AGUAS SERVIDAS DOMÉSTICAS	
Nivel de complejidad del sistema	Coefficientes de retorno
Bajo y medio	0.7 - 0.8
Medio alto y alto	0.8 - 0.85

Tabla 1. Coeficientes de retorno. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)

Caudal comercial ($Q_{comercial}$)

La EMAAP-Q, establece un rango de valores en función del área ocupada por áreas comerciales. En la siguiente tabla se presentan los valores establecidos.

CONTRIBUCIÓN COMERCIAL	
Nivel de complejidad del sistema	Contribución comercial (l/s-ha-com)
Cualquiera	0.4 - 0.5

Tabla 2. Contribución comercial. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)

Caudal institucional ($Q_{institucional}$)

El consumo de agua de las diferentes instituciones varía de acuerdo con el tipo y tamaño de las mismas, dentro de las cuales pueden mencionarse escuelas, colegios y universidades, hospitales, hoteles, cárceles, etc. (EMAAP-Q, 2009)

En la siguiente tabla se presentan los valores establecidos por la EMAAP-Q, en función del área ocupada por la institución.

CONTRIBUCIÓN INSTITUCIONAL MÍNIMA EN ZONAS RESIDENCIALES	
Nivel de complejidad del sistema	Contribución institucional (l/s-ha-Inst)
Cualquiera	0.4 - 0.5

Tabla 3. Contribución institucional. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)

2.4.2 Caudal Máximo Horario Q_{MH}

$$Q_{MH} = Q_{MD} \cdot F$$

Donde:

Q_{MD} : Caudal medio diario.

F : coeficiente de flujo máximo o factor de mayoración.

Factor de mayoración F : La relación entre el caudal medio diario y el caudal máximo horario se denomina “coeficiente de flujo máximo”. Este coeficiente varía de acuerdo a los mismos factores que influye en la variación de los caudales de abastecimiento de agua (clima, patrón de vida, hábitos, etc.), pero es afectado en menor intensidad, en función al porcentaje de agua suministrada que retorna a las alcantarillas y al efecto regulador del flujo a lo largo de los conductos de alcantarillado, que tiende a disminuir los caudales máximos y a elevar los mínimos. (CEPIS, 2005)

CEPIS (2005), establece que el coeficiente de flujo máximo podrá ser obtenido mediante las siguientes ecuaciones, es importante observar que este coeficiente tiene una relación inversa con el tamaño de la población:

$$F = \frac{Q_{max}}{Q_{med}} = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}} \quad (Harmon)$$

$$F = \frac{Q_{max}}{Q_{med}} = \frac{5}{P^{0.2}} \quad (Babbit)$$

$$F = \frac{Q_{max}}{Q_{med}} = \frac{7}{P^{0.1}} \quad (Flores)$$

$$F = k_1 \cdot K_2$$

Donde:

P: Población en miles.

k₁: Relación entre el caudal máximo diario y el caudal medio diario, igual a 1.2.

K₂: Relación entre el caudal máximo horario y el caudal medio horario, igual a 1.5.

La EMAAP-Q, establece los siguientes coeficientes de mayoración, que se presentan en la siguiente tabla.

COEFICIENTES DE MAYORACIÓN	
1.1 < K₁ < 1.4	1.43 < F < 2.66
1.3 < K₂ < 1.9	

Tabla 4. Coeficientes de mayoración. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)

2.4.3 Caudal por infiltraciones Q_{Inf}

El caudal de infiltración incluye el agua del subsuelo que penetra las redes de alcantarillado, a través de las paredes de tuberías defectuosas, uniones de tuberías, conexiones, y las estructuras de los pozos de visita, cajas de paso, terminales de limpieza, etc.(CEPIS, 2005)

La EMAAP-Q establece los siguientes valores que se presentan en la siguiente tabla.

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 alto y alto	0.15 - 0.4	0.1 - 0.3	0.05 - 0.2

Tabla 5. Valores para aportes por infiltración en función del área de la red. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)

2.4.4 Caudal por conexiones erradas $Q_{Erradas}$

Se deben considerar los caudales provenientes de malas conexiones o conexiones erradas, así como las conexiones clandestinas de patios domiciliarios que incorporan al sistema aguas pluviales. El caudal por conexiones erradas puede ser del 5% al 10% del caudal máximo horario de aguas residuales.(CEPIS, 2005)

La EMAAP-Q establece los siguientes valores guía en caso no existir registros de caudales medidos, los mismos se presentan en la siguiente tabla.

APORTES MAXIMOS POR CONEXIONES ERRADAS CON SISTEMA PLUVIAL	
Nivel de complejidad del sistema	Aporte (l/s-ha)
Bajo y medio	0.2 - 2
Medio alto y alto	0.1 - 1
APORTES MAXIMOS POR DRENAJE DOMICILIARIO DE AGUAS LLUVIAS SIN SISTEMA PLUVIAL	
Nivel de complejidad del sistema	Aporte (l/s-ha)
Bajo y medio	4 - 20
Medio alto y alto	2 - 20

Tabla 6. Aportes máximos de caudales por conexiones erradas. Fuente: (EMAAP-Q, 2009)

2.5 Contribuciones de aguas pluviales

2.5.1 Lluvia histórica registrada

Se refiere a las lluvias que produjeron serias consecuencias desde el punto de vista de inundaciones en la cuenca, y que dejaron además secuelas en la memoria histórica de la población. Este criterio no está basado en consideraciones estadísticas de riesgo, sino que se asocia a un suceso concreto. Es fácilmente explicable a la población, e incluso se puede ilustrar con documentación de los efectos producidos por la inundación histórica, indicando que esos daños ya no se producirán con las nuevas actuaciones. (Gómez, 2007)

2.5.2 Serie temporal de lluvias

Son las lluvias registradas en observatorios dentro de la zona de estudio, o incluso series sintéticas generadas a partir de métodos estadísticos. Con estos datos de lluvia, se aplica un modelo de transformación lluvia–escorrentía y así se obtienen los diferentes hidrogramas de caudal, sobre los que se realiza un análisis estadístico para determinar el valor del flujo

asociado a un periodo de retorno determinado. Si asumimos que los datos de lluvia registrados son representativos de la precipitación en la cuenca, y aceptamos que en el futuro seguirá lloviendo como hasta ahora, podemos realizar los estudios hidrológicos e hidráulicos para comprobar el comportamiento de la infraestructura a diseñar. Si, por ejemplo, tenemos datos de lluvia de 20 años, digamos unos 1200 sucesos de lluvia, por ejemplo, lo que supone una media de 60 sucesos de lluvia al año, tenemos que realizar los 1200 estudios de transformación lluvia - caudal, y los 1200 cálculos hidráulicos asociados. Podemos evaluar cuantas veces se supera la capacidad de desagüe de la obra hidráulica, en un cierto número de años. Este enfoque da como resultado el poder decir que la obra diseñada se verá superada un número x de veces en N años (igual a los que tenemos datos). No se trata de ningún concepto estadístico, ni de periodo de retorno. Se trata de un análisis de frecuencia de inundación.(Gómez, 2007)

2.5.3 Lluvias de diseño

Lluvias obtenidas a partir de información globalizada en forma de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia. Podemos definir a esta lluvia de diseño como una lluvia tipo, o lluvia sintética que se puede asociar a un cierto periodo de retorno, y se admite (a pesar de que no sea estrictamente cierto) que el caudal de escorrentía calculado a partir de esta lluvia de proyecto tiene el mismo periodo de retorno.(Gómez, 2007)

2.5.4 Lluvias de diseño a partir de curva IDF

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) representan un nivel de información global referente al comportamiento pluviométrico de una zona. Su construcción se realiza analizando los registros de todas las tormentas y sus periodos más intensos de precipitación. Estas intensidades se ordenan para cada uno de los periodos de tiempo considerados (5, 10, 15 minutos, etc.) en función de su registro, realizando un tratamiento estadístico de los datos y asignando periodos de retorno. Los resultados se presentan en forma de curva, se pueden considerar como un punto de partida para construir a partir de ellas la lluvia de proyecto que se emplea en procesos hidrológicos.(Gómez, 2007)

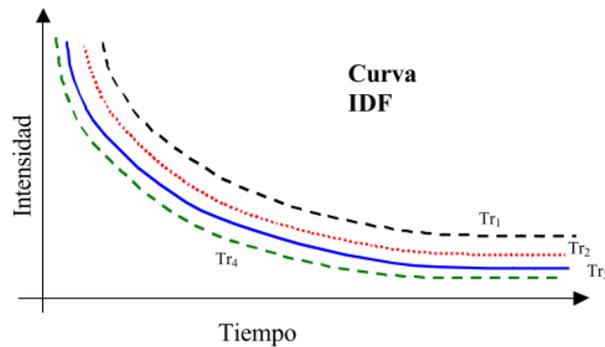


Figura 23. Curva Intensidad - Duración – Frecuencia tipo. Fuente: (Gómez, 2007)

Lluvia constante o en bloque

Sencilla de construir, considera una intensidad de precipitación constante durante todo el tiempo de lluvia. Supone que las precipitaciones causantes de problemas de inundación son aquellas de corta duración y gran intensidad. En el análisis para una cuenca pequeña asume que el mayor caudal de aporte se produce cuando toda la cuenca colabora en el proceso de escorrentía. Por lo que se supone una intensidad de precipitación constante durante un tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca. (Gómez, 2007)

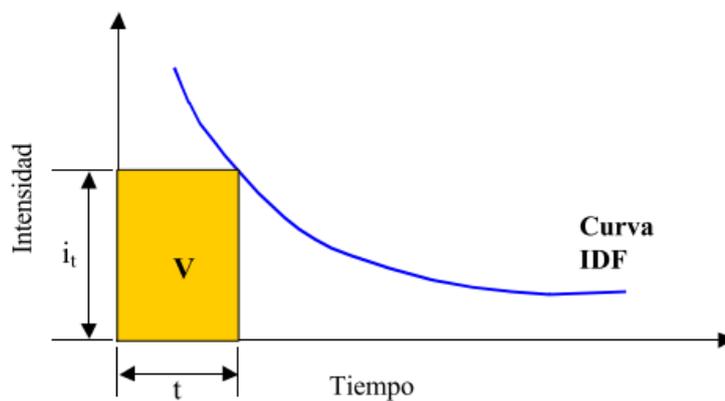


Figura 24. Tormenta de proyecto con lluvia constante. Fuente: (Gómez, 2007)

Tormenta triangular

Un triángulo es una figura simple para un hietograma de diseño debido a que una vez que se conozcan tanto la profundidad de precipitación de diseño P como la duración T_d , se determina el hietograma de diseño considerando la longitud de la base como T_d y la altura del triángulo es h , luego la profundidad total de precipitación en el hietograma está dada por

$$P = \frac{1}{2} \cdot T_d \cdot h \text{ (Chow et al., 1988)}$$

Donde:

$$h = \frac{2P}{T_d}$$

Normalmente y a falta de más información se supone un triángulo isósceles, situando la intensidad máxima en el punto medio de la duración considerada. Se puede definir un cierto coeficiente de avance o retardo de la tormenta en función de las características de la cuenca. Un coeficiente del avance de tormenta r se define como la relación del tiempo antes del pico t_a con respecto a la duración total:

$$r = \frac{t_a}{T_d}$$

El tiempo de recesión t_b está dado por;

$$t_b = T_d - t_a$$

$$t_b = (1 - r)T_d$$

El valor de r igual a 0.5 corresponde a una intensidad pico que ocurre en la mitad de la tormenta, valores menores tendrá un pico antes y un valor mayor tendrá un pico después del punto medio. En muchos lugares las tormentas tienden a ser de un tipo avanzado con r menor a 0.5, normalmente las tormentas se producen la punta de lluvia en el primer tercio del período de lluvia, sin embargo, se debe confirmar el valor para cada localidad. En la siguiente figura se observa la tormenta de diseño para el método triangular.

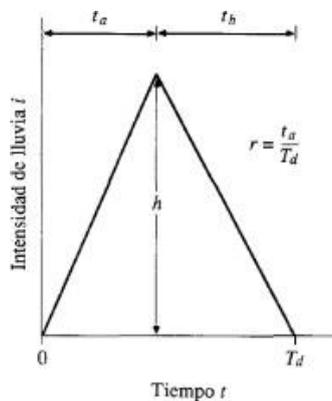


Figura 25. Tormenta triangular. Fuente: (Chow et al., 1988)

Método de los bloques alternados

Es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva IDF. Especifica la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempos sucesivos

de duración Δt respecto a una duración total $T_d = n \cdot \Delta t$. Luego de seleccionar el período de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones Δt , y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre los valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración T_d y que los demás bloques se ubiquen en forma descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central, en la siguiente ilustración se observa el hietograma de diseño para el método del bloque alterno. (Chow et al., 1988)

En la siguiente figura se presenta el hietograma de proyecto mediante el método de bloques alternados.

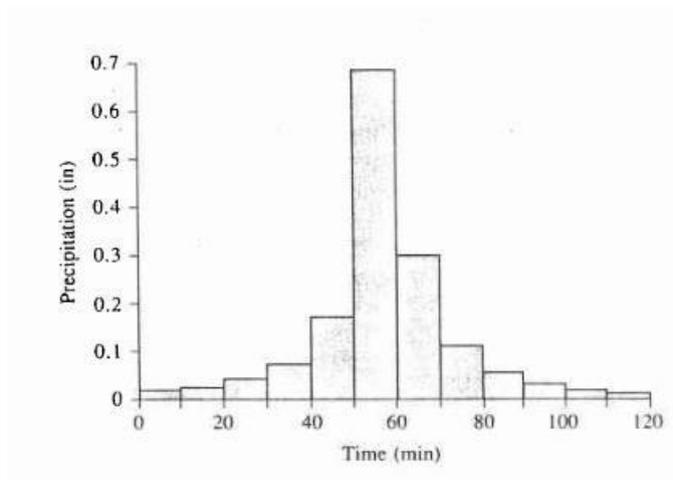


Figura 26. Método de los boques alternados. Fuente: (Chow et al., 1988)

2.5.5 Perdidas por infiltración

Valbuena (2016), en su trabajo describe, la infiltración es el proceso por el que el agua penetra desde la superficie del suelo hacia dentro del terreno. Muchos factores influyen en el proceso de infiltración entre ellos se encuentran: el estado de la superficie y su cobertura vegetal, propiedades del suelo como la porosidad, su conductividad hidráulica y el contenido de humedad del suelo. Las variaciones en espacio y tiempo dificultan conocer el correcto valor, por ello se acostumbra estimar mediante ecuaciones matemáticas.

Ecuación de Horton

Empírica y quizás sea la más conocida de las ecuaciones de infiltración. El proceso inicia a cierta capacidad (f_o), y decrece exponencialmente hasta alcanzar un ritmo constante (f_c):

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt}$$

Donde k es una constante de decaimiento. Se ha demostrado que la ecuación de Horton puede ser derivada de las ecuaciones de continuidad y de conservación del momento para el flujo en un medio poroso no saturado, considerando que la constante de Darcy y la difusividad del agua en los poros son independientes del grado de humedad del suelo. (Valbuena, 2016)

Método de Green – Ampt

Valbuena (2016) describe, que el método de Green – Amp considera un frente mojado como la frontera entre el suelo con contenido de humedad inicial θ_i y el suelo ya saturado con contenido de humedad η en este caso equivalente a la porosidad. Este frente ha penetrado hasta una profundidad L en un tiempo t desde que la infiltración comenzó. La ecuación es la siguiente.

$$F(t) = L \cdot (\eta - \theta_i) = L \cdot \Delta\theta$$

Donde F es la profundidad de agua infiltrada acumulada en el tiempo t . La ecuación de conservación del momento equivale a la ecuación de Darcy con flujo constante en la profundidad

$$f(t) = K \cdot \frac{\partial h}{\partial z}$$

Donde h es la altura piezométrica, z la profundidad y K la conductividad hidráulica. Se demuestra que, a partir de estas dos expresiones, se obtiene:

$$f(t) = K \cdot \frac{\psi \Delta\theta}{F(t)} + 1$$

$$F(t) = Kt + \psi \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta\theta} \right)$$

Donde ψ es la altura de succión en el frente de humedad. Resolviendo iterativamente la segunda expresión se obtiene la profundidad de agua infiltrada acumulada en el tiempo t con la que se puede calcular la capacidad de infiltración (p.75).

En la siguiente figura se presentan valores que pueden ser empleados para estimar diferentes propiedades según la clase del suelo.

Clase de suelo	Porosidad	Porosidad efectiva	Potencial de succión del frente húmedo	Conductividad Hidráulica
	η	θ_e	ψ cm	K cm/h
Arena	0,437 (0,374-0,500)	0,417 (0,354-0,480)	4,95 (0,97-25,36)	11,78
Arena margosa	0,437 (0,363-0,506)	0,401 (0,329-0,473)	6,13 (1,35-27,36)	2,99
Marga arenosa	0,453 (0,351-0,555)	0,412 (0,283-0,541)	11,01 (2,67-45,47)	1,09
Marga	0,463 (0,375-0,551)	0,434 (0,334-0,534)	8,89 (1,33-59,38)	0,34
Marga limosa	0,501 (0,420-0,582)	0,486 (0,394-0,578)	16,68 (2,92-95,39)	0,65
Marga arcillo-arenosa	0,398 (0,332-0,464)	0,330 (0,235-0,425)	21,85 (4,42-108,0)	0,15
Marga arcillosa	0,464 (0,409-0,519)	0,309 (0,279-0,501)	20,88 (4,79-91,10)	0,10
Marga arcillo-limosa	0,471 (0,418-0,524)	0,432 (0,347-0,517)	27,30 (5,67-131,50)	0,10
Arcilla arenosa	0,430 (0,370-0,490)	0,321 (0,207-0,435)	23,90 (4,08-140,2)	0,06
Arcilla limosa	0,479 (0,425-0,533)	0,423 (0,334-0,512)	29,22 (6,13-139,4)	0,05
Arcilla	0,475 (0,427-0,523)	0,385 (0,269-0,501)	31,63 (6,39-156,5)	0,03

Figura 27. Tabla de valores para estimar propiedades según la clase del suelo. Fuente: (Gómez, 2007)

Método del número de curva (CN)

Método desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) ahora conocido como el Natural Resource Conservation Service (NRCS), permite calcular las pérdidas producidas al formarse la escorrentía después de un evento de lluvia. Este método, a diferencia de los otros dos explicados anteriormente, tiene en cuenta el proceso de pérdidas en conjunto, de manera que incorpora tanto la infiltración como la retención e intercepción.

La cantidad de agua se convierte en lluvia efectiva, sin pérdidas (P_e) siempre es menor que la lluvia total precipitada (P), del mismo modo el agua infiltrada en la cuenca (F_a) es menor que una hipotética máxima retención potencial (S). La parte de lluvia que se pierde antes de iniciar el proceso de escorrentía se denomina (I_a). Esta hipótesis cumple la siguiente igualdad.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Por continuidad se conoce que $P = P_e + I_a + F_a$, por lo tanto:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Este es el método para obtener la cantidad de lluvia que no se pierde, por lo tanto, se convierte en escorrentía superficial. El SCS propone una relación de $I_a = 0.2 \cdot S$, para simplificar el proceso y reducir el número de incógnitas. Sin embargo, de acuerdo a la cuenca de análisis se puede escoger el valor de retención en superficie (S), mediante aproximaciones del número de curva (CN), en función del tipo y uso del suelo, que adopta valores de 0 a 100.

Clasifica los terrenos asignándoles un número entre 0 y 100, tabulado en función de la composición mineralógica del terreno, clases A, B, C y D, según sean suelos más permeables (tipo A) o más impermeables (tipo D), y una serie de ocupaciones en superficie del terreno, al que denomina número de curva CN de manera que la retención máxima, expresada en mm queda expresada de la siguiente manera:

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

Terrenos muy permeables con una capacidad de retención prácticamente infinita tendrían números de curva de 0, mientras que terrenos muy impermeables con capacidad de infiltración tienen un número de curva de 100. (Gómez, 2007)

2.5.6 Tiempo de concentración

Es el tiempo que tarda una gota de agua desde un punto más alejado de la cuenca hasta alcanzar el punto de salida. En áreas urbanas el tiempo de concentración se divide en: el tiempo que atraviesa la gota de agua por superficies impermeables hasta alcanzar el punto de entrada a la red de drenaje ($t_{entrada}$), y el otro tiempo corresponde al tiempo de transporte en la propia red (t_{viaje}).

$$t_c = t_{entrada} + t_{viaje}$$

Tiempo de entrada ($t_{entrada}$)

Gómez (2007), propone emplear la expresión propuesta por Témez para cuencas con terrenos naturales.

$$t_e = 0.3 \left(\frac{L}{j^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Donde:

t_e : tiempo de entrada (horas)

L : longitud del cauce (km)

J : pendiente media de la cuenca (m/m)

Si el terreno de escorrentía es más urbano, se puede aproximar el tipo de flujo creado por el denominado overland flow, típico de flujo en un plano, descrito por una aproximación de tipo onda cinemática. La formulación puede ser revisada en (Gómez, 2007).

$$t_e = \left(\frac{L \cdot n}{\sqrt{I_o}(i - f)^{\frac{2}{3}}} \right)^{\frac{3}{5}}$$

Donde:

L : longitud de transporte (m)

n : coeficiente de rugosidad de Manning.

I_o : pendiente media del plano (m/m)

i : intensidad de precipitación (mm/h)

f : infiltración (mm/h)

Tiempo de viaje (t_{viaje})

Corresponde al tiempo que tarda el agua en discurrir por el interior de la red. En primera aproximación podemos estimarlo como el cociente entre la longitud recorrida y la velocidad del agua.

$$t_{viaje} = \frac{L}{v}$$

Donde:

L : longitud de red (m).

v : velocidad del flujo en el interior de la red (m/s).

La velocidad del agua dentro de la red no es conocida a priori. El valor de la velocidad depende de las condiciones geométricas de la red como: sección, pendiente, rugosidad y también del caudal circulante.

2.5.7 Comportamiento hidráulico en las redes de drenaje

Las redes de drenaje como se mencionó en el apartado 2.3, están compuestas por elementos de captación, conducción, almacenamiento, derivación, etc. Siendo las tuberías

los elementos que mayor porcentaje ocupan de la red, normalmente diseñadas para trabajar en lámina libre.

El funcionamiento en lamina libre permite la incorporación de caudales. Si el colector funciona en presión, puede producirse un paso de caudales del colector al exterior. Evidentemente, ello es tanto más probable cuanto menos profundo sea el colector. Cabe indicar que siempre existe la posibilidad de que se presente un caudal superior al considerado en el proyecto y que provoque la entrada en carga del colector. (Dolz & Manuel, 1994)

La siguiente figura ilustra los cambios de gradiente hidráulico provocando sobrecarga en las tuberías.

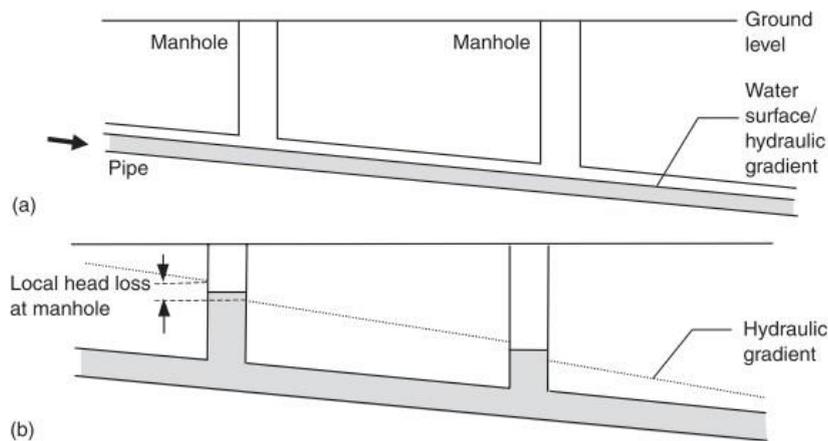


Figura 28. (a) Flujo en tubería parcialmente llena sin sobrecargar. (b) Flujo en tubería con sobrecarga. Fuente: (Butler & Davies, 2018)

Por tanto, su estudio requiere conocer las variables del movimiento (calado y velocidad) en toda sección de la red y en todo instante. Es decir, es preciso conocer las variables dependientes velocidad y calado, en función de las variables independientes posición y tiempo, para verificar, evaluar y discutir el correcto funcionamiento hidráulico en la red de drenaje.

Velocidades mínimas permisibles

EMAAP-Q (2009), establece como mínima velocidad permisible de 0.60 m/s considerando el gasto mínimo y su tirante correspondiente a tubería parcialmente llena. Adicionalmente, debe asegurarse que dicho tirante tenga un valor mínimo de 5.0 cm en casos de fuertes pendientes y de 7.5 cm en casos normales. Estas restricciones tienen por objeto evitar el depósito de sedimentos que provoquen azolves y taponamientos en la tubería.

Tensión tractiva mínima

Su aplicación permite el control de la erosión, la sedimentación y la producción de sulfuros, principalmente, en zonas de topografía plana, donde la aplicación del criterio de velocidad mínima arroja resultados menos ventajosos en términos de diámetro, pendiente y profundidad de tuberías. La fuerza de arrastre o tensión tractiva deberá tener como mínimo $r = 1$ Pascal, la misma que se determina a partir de la siguiente expresión.(CEPIS, 2005)

$$r = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot S$$

Donde:

r : Tensión tractiva (N/m², Pa)

ρ : Densidad de aguas residuales (kg/m³)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

R_h : Radio hidráulico (m)

S : Pendiente del colector (m/m)

Velocidades máximas permisibles

Para evitar erosión en las tuberías por el arrastre de partículas sólidas y suspendidas durante el escurrimiento la EMAAP – Q, ha fijado velocidades máximas de acuerdo al tipo de material de tubería empleado.

Material de la tubería	Velocidad máxima (m/s)
Tubería de Hormigón simple hasta 60 cm de diámetro	4.5
Tubería de Hormigón armado de 60 cm de diámetro o mayores	6
Hormigón armado en obra para grandes conducciones 210/240 kg/cm ²	6 - 6.5
Hormigón armado en obra 280/350 kg/cm ² . Grandes conducciones	7 - 7.5
PEAD, PVC, PRFV	7.5
Acero	9 o mayor
Hierro dúctil o fundido	9 o mayor

Tabla 7. Velocidades máximas de acuerdo al tipo de material de tubería. Fuente: EMAAP-Q

Capacidad en tuberías

CEPIS (2005) recomienda mantener el nivel de agua en las alcantarillas por encima del 20% del diámetro de la tubería (0.2D) y fijar el nivel máximo de agua en la alcantarilla en el

80% del diámetro (0.8D). Es fácilmente demostrable que con este nivel en un colector circular se alcanza la velocidad más alta. La parte vacía de la sección por encima de 0.8D se emplea para ventilación, movimiento de los gases, sirviendo además para los flujos excepcionales.

$$0.2D < \frac{y}{D} < 0.8D$$

Donde:

y: Calado de agua en la tubería (m).

D: Diámetro de la tubería (m).

La EMAAP – Q, establece como valores máximos deben ser entre el 75 % y 85% de la sección del diámetro.

2.6 Drenaje Urbano Sostenible

Se define al desarrollo sostenible, como un desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Es así que, el drenaje urbano sostenible contribuye a solucionar problemas asociados con el agua lluvia presente en las ciudades. La necesidad de aplicar los principios del desarrollo sostenible al diseño del drenaje urbano se debe fundamentalmente al incremento de las superficies impermeables y de los problemas asociados a la escorrentía superficial generada. En este sentido, la filosofía del drenaje sostenible pretende tratar de la forma lo más natural posible el agua de lluvia y aprovecharla al máximo, sin convertirla en agua residual, con el objetivo de completar la labor realizada por los sistemas de drenaje convencionales y mejorar el rendimiento de estos. (Sañudo et al., 2012)

Estas soluciones engloban distintas terminologías. Valbuena (2016) en su trabajo resume las diferentes terminologías para referirse a las nuevas técnicas de drenaje urbano sostenible, las mismas que se detallan a continuación:

Low impact development (LID) y low impact urban design and development (LIUDD): Este término se ha utilizado principalmente en América del Norte y Nueva Zelanda.

Water sensitive urban design (WSUD): El término se comenzó a utilizar en Australia a principios de los años 1990.

Integrated urban water management (IUWM): El concepto empezó a utilizarse en los años 1990s, engloba tanto la gestión del agua de lluvia como de las aguas residuales, suministro de agua potable y aguas subterráneas.

Sustainable urban drainage systems (SUDS) o sustainable drainage systems (SuDS): El nuevo enfoque de la gestión de aguas pluviales surge en el Reino Unido a finales de la década de 1980 y principios de los 1990s cuando CIRIA publica sus guías para el uso de una serie de técnicas de control de la escorrentía. Esta terminología será empleada en el desarrollo de este trabajo.

Best management practices (BMPs): Este término se usa en Norte América para describir principalmente medidas de prevención de la contaminación por parte de las aguas residuales. El término nace en 1972 e incluye prohibición de ciertas prácticas, procedimientos de mantenimiento, requerimientos de tratamiento, procedimientos de operación, prácticas de control de la escorrentía, vertidos, etc.

Stormwater control measures (SCMs): SCMs surge como alternativa al término BMPs debido a su creciente impopularidad por ser este último demasiado impreciso.

Alternative techniques (ATs) or compensatory techniques (CTs): Se trata de un término utilizado en Francia, que surgió a principios de los años 1980s para describir nuevas tendencias en el drenaje urbano. Se trataba de soluciones más “naturales” que promovían, no solo solventar problemas de contaminación, sino también mejorar la calidad de vida en las ciudades.

Woods Ballard y otros (2015) indican que, si no cambiamos la forma en que diseñamos nuestras áreas urbanas y gestionamos la escorrentía de aguas superficiales de manera más efectiva, estos problemas empeorarán. Las proyecciones sobre el cambio climático muestran que es probable que las fuertes lluvias y las inundaciones sean más frecuentes. Continuar proporcionando nueva capacidad de alcantarillado para hacer frente a estos riesgos crecientes se requiere de mucha inversión económica y tiempo.

En las siguientes figuras se presentan los cambios en el uso de suelo por efectos del desarrollo urbano y la aplicación de SUDS para repercutir dichos procesos.

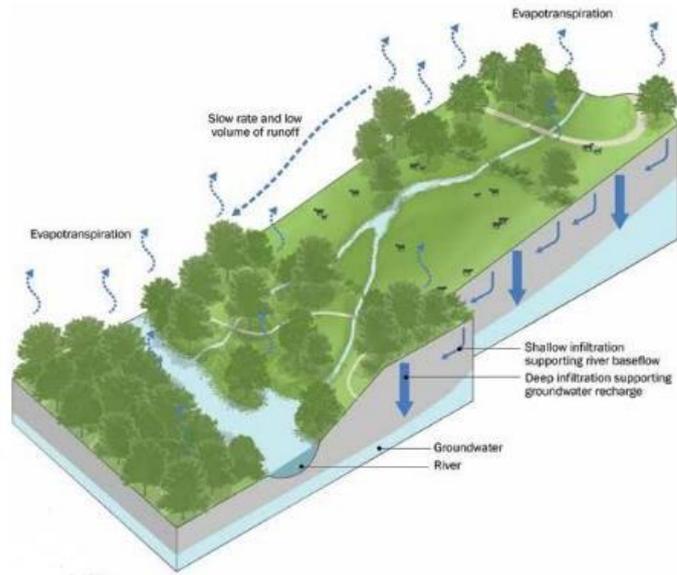


Figura 29. Área natural sin desarrollo urbano. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015)

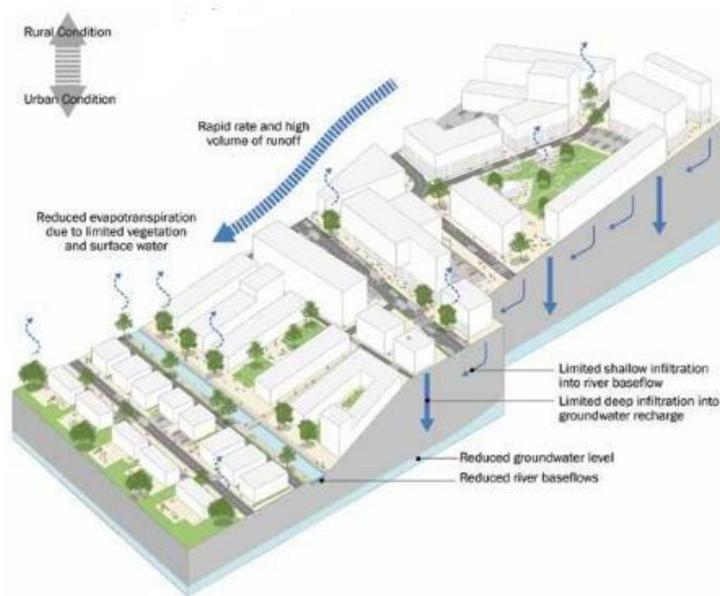


Figura 30. Área impermeable producto del desarrollo urbano. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015)

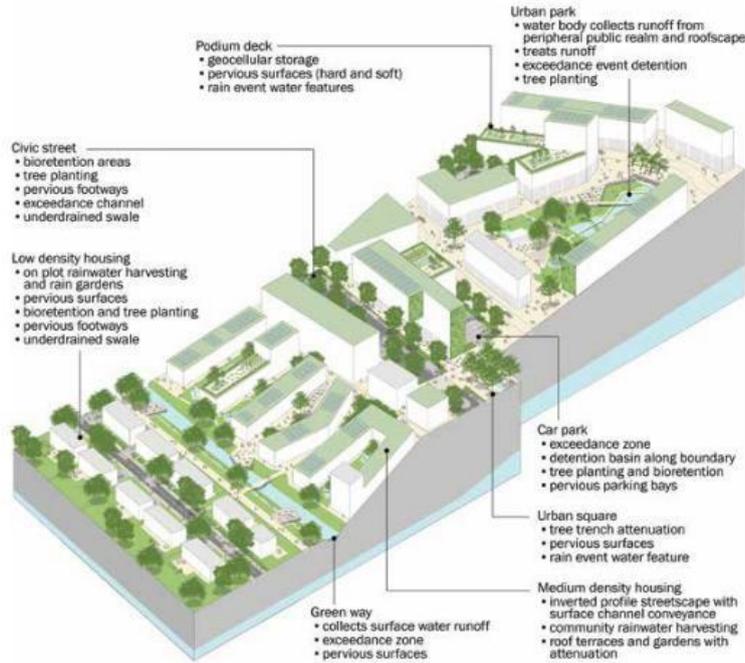


Figura 31. Aplicación de SUDS en diferentes lugares de la urbe. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015)

2.6.1 Beneficios de emplear SUDS

CIRIA propone en su manual una división de estos beneficios en cuatro categorías: beneficios en el control de la cantidad de agua, en la gestión de la calidad de la escorrentía para prevenir la contaminación, crear y mantener mejores lugares que ofrecer a los ciudadanos y crear y mantener lugares más respetuosos con la naturaleza.

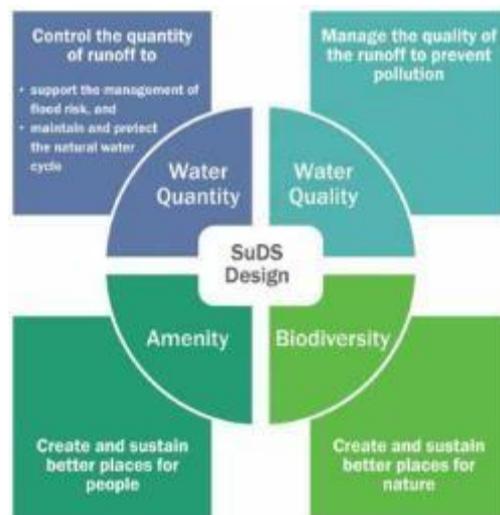


Figura 32. Cuatro pilares del diseño de SUDS. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015)

Cantidad de agua

Atenuar la escorrentía mediante la retención de parte del volumen de agua precipitado desde el momento en que cae. La mayoría de elementos SUDS disponen de capas destinadas para almacenar el agua que cae sobre ellos o incluso parte de la lluvia caída en otras partes de la calle. De esta manera se reduce y ralentiza la escorrentía en las calles mientras llueve y se libera posteriormente con el caudal deseado hacia la red del sistema de alcantarillado. (Valbuena, 2016)

En la siguiente figura muestra el pico del hidrograma de descarga se logra aplanar e igualar a condiciones naturales previo a la urbanización.

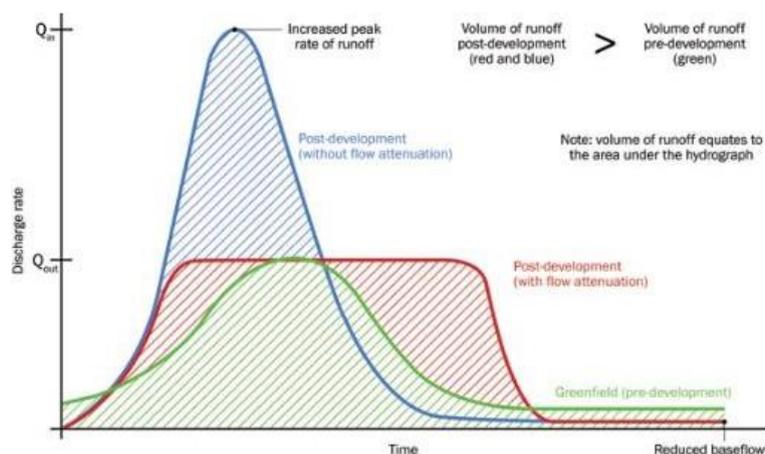


Figura 33. Hidrograma de escorrentía. Fuente: (Woods Ballard et al., 2015)

Calidad de agua

Mejorar la calidad del agua proveniente de la escorrentía, siendo capaces de tratar y limpiar la escorrentía superficial de áreas urbanas para proteger los cuerpos receptores, contribuyendo la flora y fauna del lugar. Los procesos que mediante SUDS retiene y elimina contaminantes son: Adsorción, sedimentación, filtración, bio-filtración, bio-acumulación, volatilización. (Valbuena, 2016)

Biodiversidad

Crear nuevos hábitats y rehabilitar espacios que proveen un entorno saludable y estimulante. Valbuena (2016) lista los siguientes beneficios.

- Apoyo y protección al hábitat natural local de las especies.
- Contribución a la consecución de los objetivos de biodiversidad locales contemplados en los marcos y estrategias de actuación.

- Contribuir a la conectividad de hábitats entre espacios verdes dentro de la ciudad. - Creación de ecosistemas diversos, resilientes y autosuficientes.

Calidad de vida

Incluir áreas de vegetación aporta directamente a mejorar la calidad del aire y reducir emisiones de carbono y otros gases de efecto invernadero. Además, permite reutilizar volúmenes de agua almacenada para diferentes usos, contribuyendo al ahorro sustancial del consumo público. Por otra parte, genera seguridad a los ciudadanos ante posibles eventos de desastres.

Inconvenientes de emplear SUDS

- El desconocimiento por parte de los diseñadores por la escasa difusión.
- La desconfianza que genera frente al drenaje convencional.
- La inexperiencia en el sector de la construcción en su adecuada ejecución.
- La necesidad de un mantenimiento y monitoreo específico.
- Se limita su uso si el nivel freático se encuentra cerca de la superficie y en áreas con pendientes elevadas.

2.6.2 Tipologías

Medidas no estructurales

No implican directamente la construcción de ningún tipo de infraestructura, o rehabilitación en las redes de drenaje. Son únicamente medidas preventivas para decidir y actuar en planeamiento urbano. Sañudo y otros (2012) clasifican en tres técnicas fundamentales: legislación, formación e inversión, las mismas que se detallan a continuación.

Legislación: Desde el punto de vista legal, existen formas de intervención tales como:

- Regulación: ordenanzas sobre medio ambiente, estudios de impacto ambiental previo a desarrollar un proyecto.
- Planeamiento urbanístico: recuperar y preservar áreas verdes, limitando áreas de construcción, considerando el equilibrio entre áreas permeable e impermeables.

Formación: En limpieza de calles, imbornales, cunetas para evitar colmatar a los elementos de captación de la escorrentía superficial. Además, prevendrá en gran medida la contaminación a los cuerpos receptores causas por el primer lavado de contaminantes (first flush).

Inversión: Esta medida se centra en la promoción, capacitación y seguimiento de las medidas legales, con la finalidad de evidenciar el correcto control de las normativas vigentes.

Medidas estructurales

Implican elementos constructivos, formado parte del sistema de drenaje urbano. Entre ellos están:

Tejados verdes

Conocidas como “Green Roofs”, es un método de almacenamiento en sitio, mediante la implantación de vegetación en las cubiertas de los edificios. Es un sistema multicapa, la cual, la capa superficial contiene la vegetación, seguida de una capa de almacenamiento o filtración y por último, una capa de drenaje. Contribuye a la reducción y retardo de la escorrentía, su eficiencia se centra en eventos de corta duración y bajas intensidades.



Figura 34. Centro de convenciones en Vancouver - Canadá, inaugurado en 2009. Fuente: (Santamaría, 2016)

Sistemas de infiltración

Engloba una serie de elementos de drenaje urbano sostenible con el principal objetivo de favorecer la infiltración de la escorrentía urbana. Los principales y más comunes sistemas de infiltración son los pozos, zanjas y depósitos de infiltración.

Los pozos de infiltración (Infiltration soakaways)

Conforman pequeños volúmenes de retención, frecuentemente construidos en propiedades privadas, bajo jardines. Estos almacenan temporalmente la escorrentía proveniente

normalmente de tejados. Existen varios tipos de pozos de infiltración; entre ellos existen los pequeños pozos construidos con elementos modulares o materiales granulares envueltos de geotextil y los más voluminosos, prefabricados de hormigón perforado, rodeados de relleno granular.



Figura 35. Pozo de infiltración rodeado de relleno granular. Fuente: (Quiroz & Becerra, 2018)



Figura 36. Pozo de infiltración con elemento modular. Fuente: (Abellán, 2016b)

Las zanjas de infiltración (infiltration trenches)

Son depósitos lineales. La ventaja que ofrecen respecto a los pozos de infiltración es que pueden ser menos profundos, más estrechos y estar abiertos a la superficie. Además, pueden repartir su área en planta sobre diferentes tipos suelos, mientras que el pozo puede recaer por completo sobre un material poco filtrante. Cuando las zanjas filtrantes tienen el

objetivo de transportar la escorrentía hacia otros sistemas de tratamiento mayor o al medio receptor directamente se denominan habitualmente drenes filtrantes; estas pueden incluir una tubería perforada embebida en el material poroso para facilitar la circulación del agua.



Figura 37. Zanjas de infiltración. Fuente: (Abellán, 2016c)

Los depósitos o estanques de infiltración (infiltration basins)

Son depresiones en el terreno diseñados para almacenar el agua de lluvia en superficie mientras permiten que esta vaya infiltrando en el terreno según el tipo de suelo. Generalmente están cubiertos de vegetación y captan la escorrentía de las superficies impermeables adyacentes. Se está popularizando últimamente su uso en glorietas y rotondas.



Figura 38. Depósito de retención. Fuente: (Abellán, 2016a)

Sistemas de bioretención

La aplicación de estos sistemas de drenaje urbano sostenible se limita en ubicar en zonas de altas pendientes. Permiten el almacenamiento, infiltración y tratamiento de contaminantes arrastrados por la escorrentía. Pueden adaptarse en espacios urbanos

como: parqueaderos, aceras, espacios en zonas comerciales, etc. Es un sistema multicapa, constituido por una capa vegetal, seguida por una capa drenante, finalmente por una capa de almacenamiento que puede estar conectada a un sistema de desagüe o en suelo nativo para aprovechar de la infiltración. En caso de fuertes eventos el volumen de agua que no ingresa inmediatamente en el sistema, queda retenida en la superficie para posteriormente ser infiltrada,

Como un sistema de bioretención es el jardín de lluvia (rain garden), su uso es más empleado en propiedades privadas, por el reducido espacio que ocupa.



Figura 39. Sistema de bioretención ubicado en estacionamientos. Fuente: (Agencia Iberoamericana para la difusión de la ciencia y la tecnología, 2016)

Pavimentos permeables

Es un sistema de gestión de agua de lluvia en origen que intercepta, retiene e infiltra la escorrentía, contribuyendo a atenuar el pico del hidrograma de salida y reducir el volumen total de escorrentía. Existen dos técnicas diferentes para obtener un pavimento permeable. Primero, mediante pavimentos porosos que filtran el agua a través de la totalidad del material en superficie y segundo, pavimentos permeables conformada en la superficie por un material impermeable dejando espacios entre bloques para permitir el paso de agua. A partir de estas clasificaciones, desencadena múltiples tipologías en función de los materiales empleados en su construcción. Valbuena (2016) detalla algunas de ellas, tales como: pavimentos permeables modulares, consiste en empedrar la superficie con bloques de hormigón, roca, etc., dejando amplias juntas entre ellos. Asfalto poroso, consiste en aumentar la relación de poros eliminando la porción de finos de la mezcla. Césped reforzado, en la cual se emplean mallas de hormigón o polímeros rellenas de césped sembrado. Grava fijada con resina, es común su uso en zonas de tráfico ligero. Hormigón

poroso, su mezcla permite el paso de agua a través de él. Pavimentos de bloques porosos, consisten de un tipo de pavimento permeable modular cuyos bloques están fabricados de hormigón poroso, priorizando la infiltración a través del propio hormigón y por las juntas.



Figura 40. Pavimento permeable mediante asfalto poroso. Fuente: (AsfaltosUnico, 2018)



Figura 41. Pavimento permeable mediante bloques modulares. Fuente: (EXPOCIHAC, 2023)

Cunetas verdes

Son cunetas excavadas en el terreno sin revestir, cubiertas de vegetación. De esta manera permiten la infiltración a través de su base y paredes mientras transportan la escorrentía de un punto a otro. Se considera como canales naturalizados poco profundos a cielo abierto que cumplen una función de reducción, atenuación y tratamiento de la escorrentía. Se utilizan principalmente para recolectar la escorrentía generada en un pavimento adyacente sustituyendo las cunetas revestidas de hormigón en calles, avenidas, carreteras, aceras, etc. Para tormentas de gran periodo de retorno, las cunetas aportarán poca ayuda en cuanto a reducción de volumen de escorrentía, pero si en lo que respecta a la atenuación del pico de caudal ya que, al fin y al cabo, todo el volumen de agua que admite la cuneta será retenido cierto tiempo. (Valbuena, 2016)



Figura 42. Sistema de drenaje de autopista mediante cuenta verde. Fuente: (Navarro, 2018)

Sistemas de almacenamiento

Consiste en tanques o depósitos que recolectan el agua de lluvia caída en superficies impermeables como techados y la almacenan para darle un posterior uso. Es un método de reciclaje del agua de lluvia que colabora para solventar los problemas de demanda de agua de las ciudades y, al mismo tiempo, para reducir la escorrentía que circulará por los colectores. Los usos que se le puede dar al agua almacenada van desde aplicaciones domésticas como el riego, cisternas de baño y limpieza, hasta aplicaciones comerciales o industriales. Para algunos de los usos el agua deberá ser sometida a un proceso de pretratamiento. De momento, su uso para la producción de agua potable no es habitual ni recomendable. Uno de los sistemas de almacenamiento más empleados a nivel residencial son los barriles de lluvia (Rain Barrel). Su función es exclusivamente la atenuación del pico de caudal de escorrentía, se puede disponer un tanque que almacene el mayor volumen de agua posible durante la tormenta y que lo libere un tiempo después de que haya terminado, cuando la red de colectores ya no esté tan saturada. Se teoriza que, si cada vivienda emplea los menos dos barriles de lluvia con una capacidad de 1 m^3 , es capaz de capturar la escorrentía del tejado para un periodo de retorno de 5 años. (Valbuena, 2016)



Figura 43. Uso de barriles de lluvia en serie a nivel residencial. Fuente: (Ryan, 2023)

2.6.3 Modelo SWMM 5.2

Descripción del software

Desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos, en 1969-1971. El software SWMM (Storm Water Management Model) permite simular procesos de lluvia-escorrentía, que permiten calcular la cantidad y calidad del agua en medio urbano. El componente de cálculo hidrológico de SWMM transforma la precipitación recogida en cada subcuenca en escorrentía, e incluye a petición del usuario una carga de contaminantes. El componente de cálculo hidráulico transporta esta escorrentía a través de un sistema de conductos, canales a cielo abierto, depósitos, elementos de tratamiento, bombas y reguladores. Además, monitoriza la cantidad y calidad de la escorrentía generada en cada subcuenca, y en los colectores permite monitorear el caudal, calado y calidad de agua que circula.

En definitiva, SWMM lo que hace es modelizar el ciclo del agua en medio urbano, teniendo en cuenta los impedimentos que genera la urbanización al desarrollo natural del drenaje de una cuenca. Por otra parte, es capaz de modelizar redes de drenaje tanto unitarias como separativas, así como cuencas y cauces naturales. Los principales elementos que contiene un modelo en SWMM son: Subcuencas (Subcatchment), pluviómetro (Rain gage), nodos (Junctions), conductos (Conduits), salidas (Outfall).

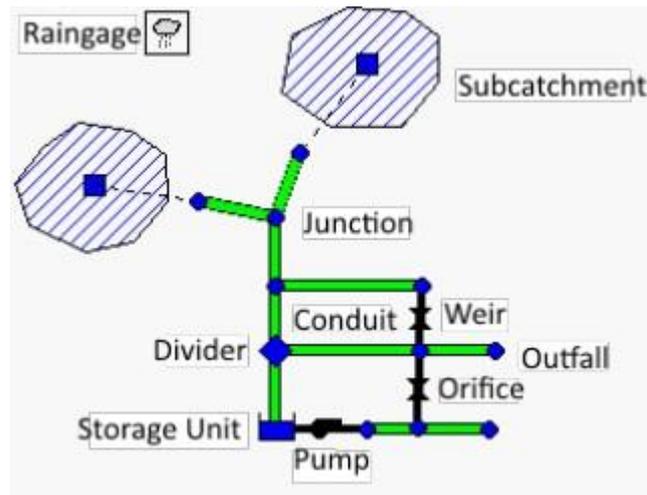


Figura 44. Modelo conceptual de SWMM en un sistema de drenaje. Fuente: (L. A. Rossman & Huber, 2016)

Método de modelización y cálculo

Proceso lluvia-escorrentía

La variabilidad espacial de la cuenca de estudio se controla dividiendo en una serie de subcuencas de menor tamaño, para cada una de ellas el programa genera escorrentía de acuerdo a las características de entrada para cada una de las subcuencas.

El software SWMM conceptualiza la subcuenca como una superficie rectangular de área A , con pendiente uniforme S y ancho W que drena hacia un único punto de salida. La escorrentía superficial se genera modelizando la subcuenca como un depósito no lineal, es decir la subcuenca recibe un caudal de entrada procedente de la precipitación y pérdidas por infiltración, almacenamiento en depresiones del terreno y evapotranspiración. En la siguiente figura se presenta el esquema de modelización y conceptualización de la subcuenca.

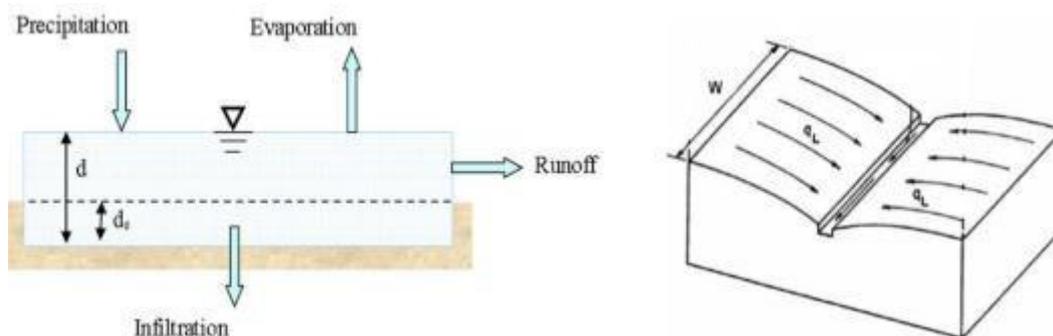


Figura 45. Esquema de reservorio no lineal en la modelización de la subcuenca (izquierda) y conceptualización de la subcuenca (derecha). Fuente: (L. A. Rossman & Huber, 2016)

El desarrollo de la ecuación no lineal ordinaria que representa el cambio en la altura de la lámina de agua d en el tiempo t , a mayor detalle puede revisarse en (L. A. Rossman & Huber, 2016) el resultado se muestra a continuación.

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha(d - d_s)^{\frac{5}{3}}$$

$$\alpha = \frac{1.49 \cdot W \cdot S^{0.5}}{A \cdot n}$$

Donde:

i : Intensidad de precipitación.

e : Evaporación.

f : Infiltración.

d : Altura de lámina de agua

d_s : Capacidad de retención en superficie.

W : Ancho de canal.

S : Pendiente de canal.

A : Área de la sección transversal.

n : Coeficiente de Manning

Cálculo hidráulico en la red de colectores

Flujo uniforme (steady flow)

Se refiere a un cálculo en régimen permanente, donde en cada conducto se traslada el hidrograma calculado desde aguas arriba hacia aguas abajo, sin modificarlo y sin generar un decaje temporal. Esta opción de cálculo no permite considerar efectos de propagación, laminación de caudales, efectos de reflujos, etc. Esta opción solo puede aplicarse y con reservas a redes de tipo arborescente, aquellas en que en cada nudo hay un único colector de salida. (Gómez, 2007)

Onda cinemática

Este cálculo se resuelve una aproximación de las ecuaciones de Saint-Venant, considerando la ecuación de equilibrio de fuerzas solo con las componentes de gravedad y

fricción. El modelo limita así el máximo caudal de circulación por cada conducto como el caudal a sección llena. Caudales mayores de paso serían expulsados de la red, o almacenados en el pozo de aguas arriba para ser reintroducidos más tarde cuando el sistema lo permita. La onda cinemática no permite atenuar puntas de caudal, no modela la entrada en carga, ni tampoco los efectos de reflujos, es decir, todo aquello producto de las condiciones de contorno aguas abajo. Permite trabajar con intervalos de tiempo mayores que otras opciones, del orden de varios minutos frente a pocos segundos, y es más estable desde el punto de vista de cálculo sobre todo en caso de flujos rápidos. No se puede aplicar a redes malladas, sino tan solo a las arborescentes. El cálculo es más rápido que la propagación con onda completa, y en ocasiones se utiliza como opción para la simulación siempre que la red sea arborescente y predomine el régimen rápido en toda la red, sin problemas de influencias de las condiciones de contorno aguas abajo. (Gómez, 2007)

Onda dinámica

Esta opción es la que se aproxima más a la realidad de lo que sucede en la red de drenaje. Se consideran todas las fuerzas actuantes, gravedad, fricción, presión e inercia, y permite simular los efectos de laminación, reflujos, condiciones de contorno aguas abajo o entrada en presión de la red. Al resolver las ecuaciones completas de Saint Venant, puede aplicarse a redes malladas, así como por supuesto a las arborescentes. Acepta flujos superiores en cada conducto al máximo aceptable a sección llena en régimen permanente, y permite simular la salida de agua desde la red, eliminándola del sistema o almacenándola en cada pozo para volver a introducirla en la red. SWMM, utiliza para resolver las ecuaciones, tipo diferencias finitas explícitas, necesita intervalos de tiempo más cortos, de menos de un minuto en general, lo que puede suponer para sistemas grandes mayor tiempo de cálculo. (Gómez, 2007)

SUDS en SWMM 5.2

SWMM5.2 permite simular ocho tipologías diferentes de SUDS, las mismas que simulan procesos de retención, infiltración, evapotranspiración y reducción de carga contaminante. Los sistemas urbanos de drenaje sostenible que incluyen en SWMM se representan como una combinación de capas verticales cuyas propiedades se definen por unidad de área, esto permite aplicar diferentes tipologías de SUDS en cada subcuenca.

Se puede simular de dos diferentes maneras en una subcuenca. El primer método permite situar un conjunto de diferentes técnicas en una misma subcuenca, lo que hará que la proporción de área no cubierta por SUDS disminuya, empleando este método hace que los sistemas urbanos de drenaje sostenible actúen en paralelo. El segundo método es crear

una subcuena adicional específicamente para ser ocupada por el SUDS, de esta manera se puede aprovechar para simular en serie, es decir, hacer que el caudal de salida de un SUDS sea el de entrada en el siguiente. Además, el porcentaje de área impermeable y el parámetro de ancho de la subcuena deben ser ajustados proporcionalmente para compensar el área que ha sido ocupada por los SUDS. En la siguiente figura se esquematiza el ajuste de los parámetros al implementar SUDS en la subcuena.

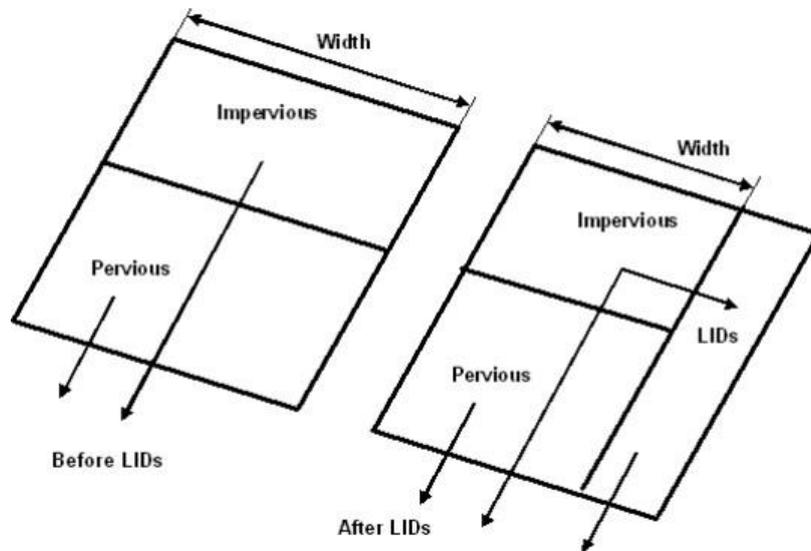


Figura 46. Ajuste de los parámetros de porcentaje de área impermeable y ancho después de ubicar un SUDS (LIDs) en una subcuena. Fuente: (L. Rossman, 2015)

Tipologías

Celdas de bio-retención (Bio-retention cells)

El software SWMM 5.2, facilita la simulación de esta técnica mediante la capa de superficie, suelo drenante y una capa de almacenamiento como se muestra en la siguiente figura.

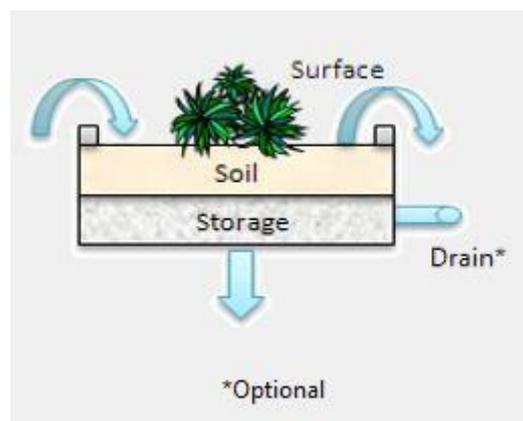


Figura 47. Esquema de la modelización de las celdas de bio-retención en SWMM.

Jardines de Lluvias (Rain gardens)

Los parámetros de la capa de superficie y suelo drenante definen las propiedades del SUDS.

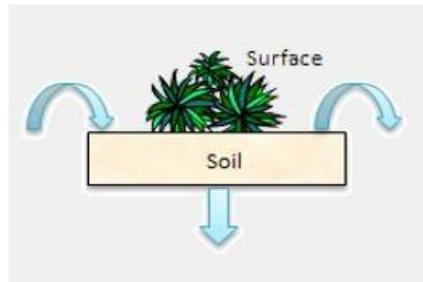


Figura 48. Esquema de la modelización de jardines de lluvia en SWMM.

Techos verdes (Green roofs)

Cuenta con tres capas en las cuales se incluirán todos sus parámetros para la correcta simulación.

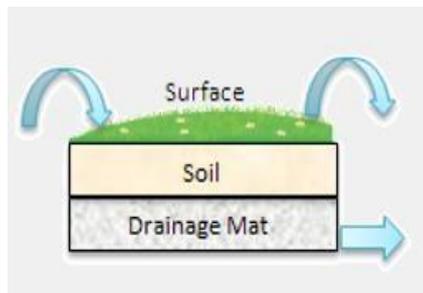


Figura 49. Esquema de la modelización de techos verdes en SWMM.

Zanjas de infiltración (Infiltration trenches)

Únicamente necesita los parámetros de la capa de superficie y almacenamiento, en caso de evacuar el flujo es necesario especificar el tipo de drenaje.

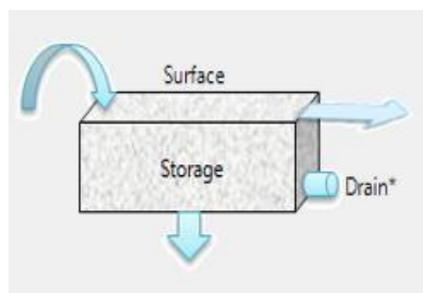


Figura 50. Esquema de la modelización de zanjas de infiltración en SWMM.

Pavimento permeable (Permeable pavement)

De acuerdo a los requerimientos de sistema de drenaje se incluyen los parámetros en cada capa, SWMM permite simular los pavimentos permeables mediante cuatro capas.

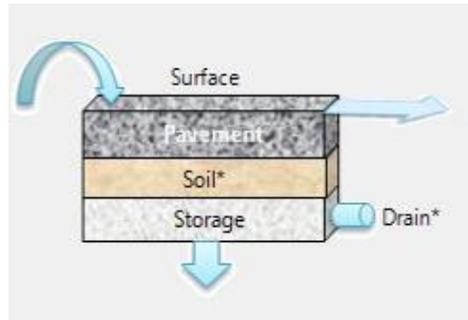


Figura 51. Esquema de la modelización de los pavimentos permeables en SWMM.

Depósitos de lluvias (Rain barrels)

Únicamente requiere los parámetros de la capa de almacenamiento es decir la altura del depósito puede ser una cisterna o un barril. En caso de drenar el flujo se debe configurar los parámetros de salida.

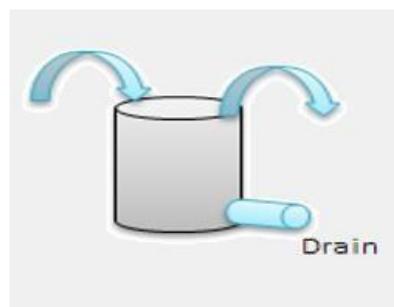


Figura 52. Esquema de la modelización de los depósitos de lluvia en SWMM.

Desconexión de bajantes de tejados (Rooftop disconnection)

Permite desconectar la escorrentía de los tejados hacia áreas permeables, comprende únicamente de la capa de superficie donde se debe indicar la rugosidad del tejado, pendiente y en caso de almacenar volúmenes de escorrentía indicar su altura.



Figura 53. Esquema de la modelización de desconexión de bajantes en SWMM.

Cunetas verdes (Vegetative swales)

Únicamente se debe especificar los parámetros para la capa de superficie, es decir, para metros como: altura de berma, volumen de vegetación, rugosidad, pendiente, etc.

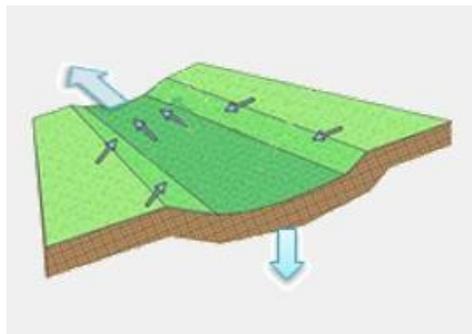


Figura 54. Esquema de la modelización de cunetas verdes en SWMM.

3. Metodología

3.1 Diagrama de flujo

En la figura 55, se presenta el diagrama de procesos para la elaboración del presente trabajo.

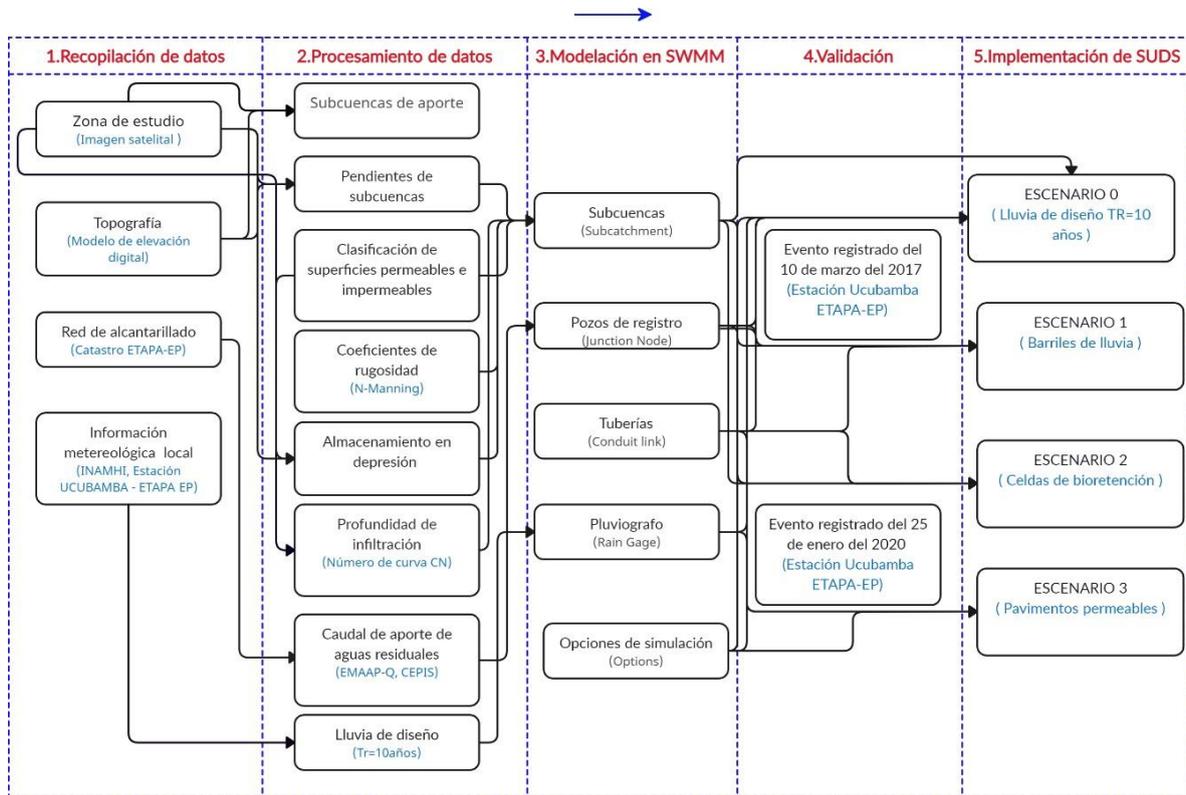


Figura 55. Diagrama de flujo de metodología empleada

3.2 Recopilación de datos

3.2.1 Zona de estudio

La cuenca de análisis se encuentra ubicado en la parroquia urbana Huayna Cápac de la ciudad de Cuenca. Comprende un área de aproximadamente de 21.5 ha, se encuentra limitada al norte por la Av. 24 de Mayo, al sur por la Autopista Cuenca-Azogues, al este por la calle Las Golondrinas y al oeste por la calle Hernán Malo. La ubicación se evidencia en la siguiente figura.

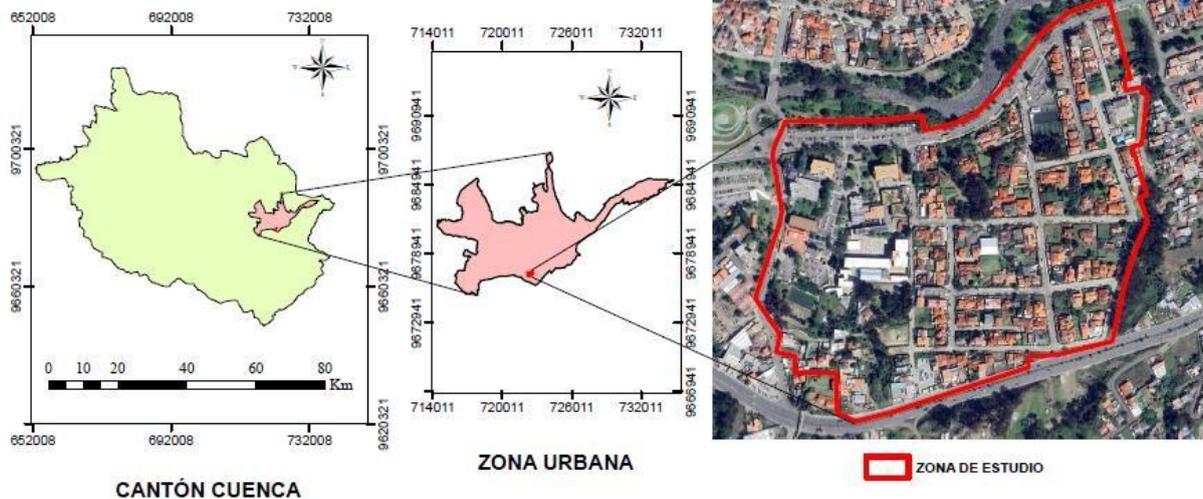


Figura 56. Ubicación de zona de estudio. Fuente: Imagen satelital de Google maps

3.2.2 Topografía

Los datos topográficos de la zona se obtuvieron de manera indirecta, a partir de un Modelo de Elevación Digital (MED), posteriormente empleando un sistema de información georreferenciada como Arcgis, se obtuvo las curvas de nivel cada 5m, la misma que permite dividir la cuenca urbana en subcuencas de menor tamaño, identificando direcciones de flujo y el área de aporte para cada subcuenca. En la siguiente figura se presenta la topografía de la zona.

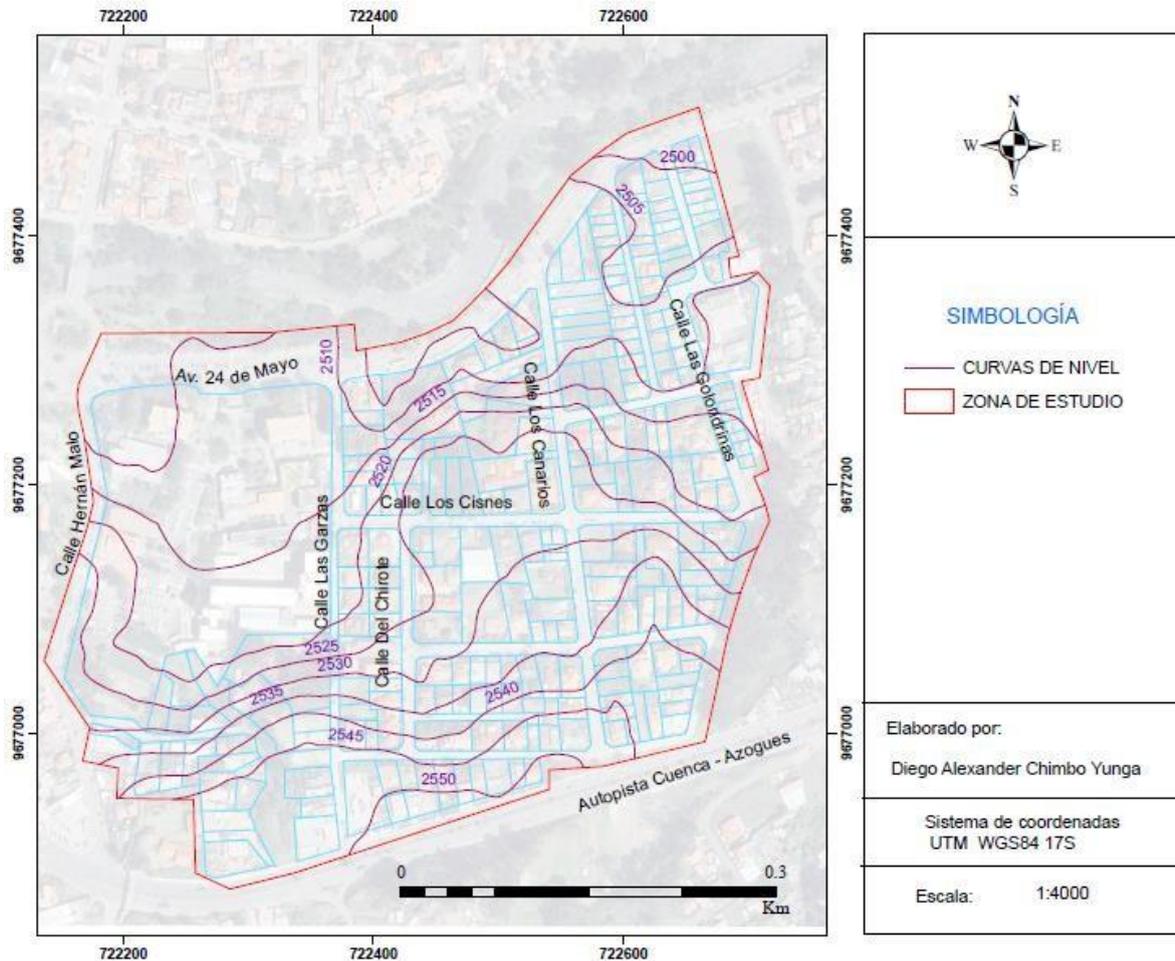


Figura 57. Topografía de la zona de estudio. Fuente: (Elaboración propia)

3.2.3 Red de alcantarillado

En base al catastro facilitado por la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable y Alcantarillado ETAPA EP, el área de análisis comprende la mayor parte de un sistema de alcantarillado combinado, en algunos tramos posee un sistema sanitario y pluvial, sin embargo, todos descargan al colector principal que atraviesa la Av. 24 de Mayo. La red de estudio dispone de 107 conductos y 122 pozos de registro, el 80% de las conducciones son de hormigón simple y el restante son de material PVC. Las dimensiones de dichas conducciones oscilan entre 200 mm y 600 mm, siendo en su totalidad conductos circulares. En la siguiente ilustración se presenta la red de alcantarillado de la zona de estudio.

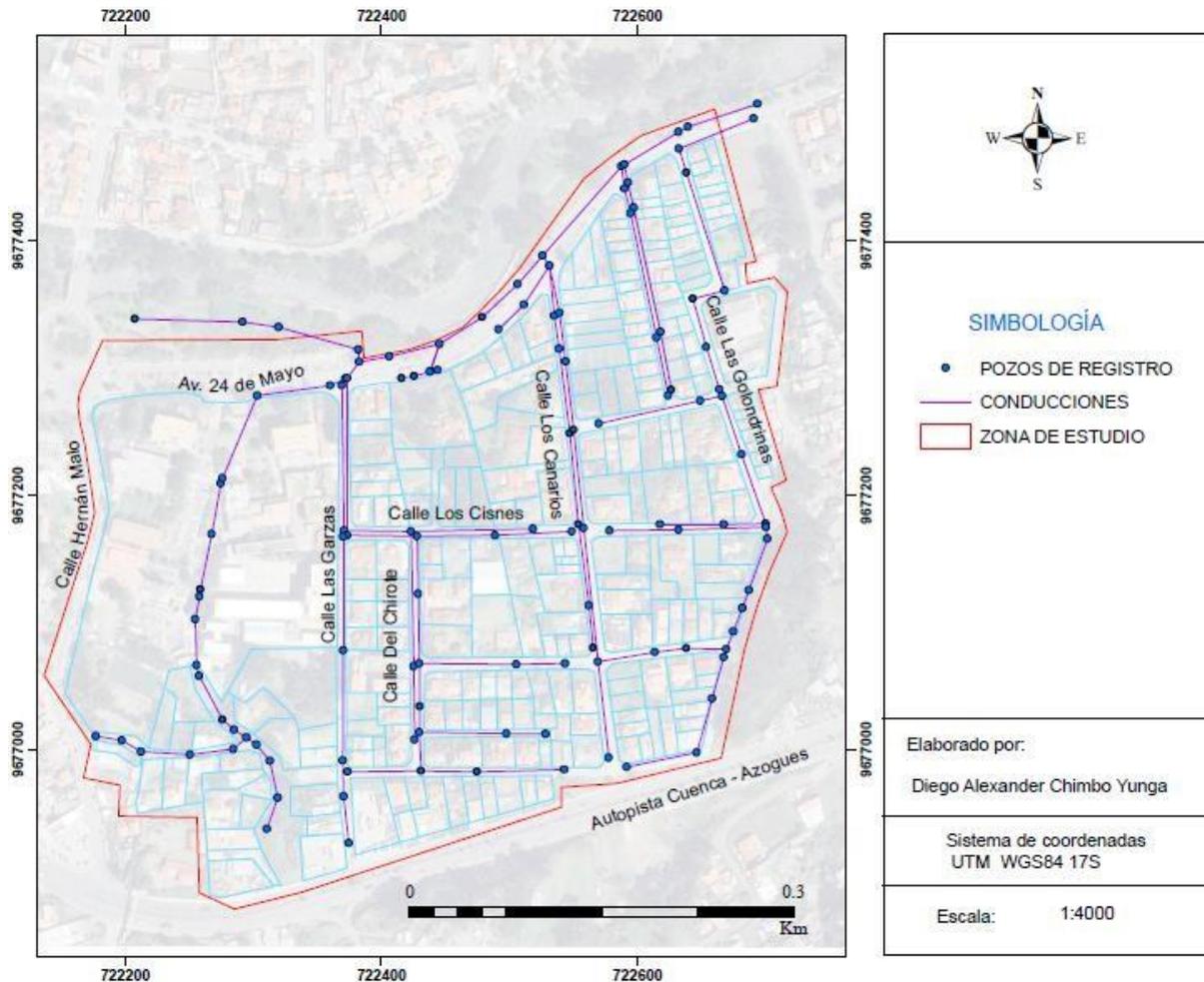


Figura 58. Red de alcantarillado de la zona de estudio. Fuente: ETAPA-EP

3.2.4 Información meteorológica local

El modelo utilizará dos lluvias registradas que corresponden a eventos que provocaron estragos en diferentes sectores de la ciudad y en el sector de la Universidad del Azuay. Los eventos corresponden a las siguientes fechas: 10 marzo de 2017 con una duración de 30 minutos y el 25 de enero de 2020 con una duración de 60 minutos. Estas lluvias registradas permiten validar el comportamiento de la red de drenaje actual. Además, con una lluvia de diseño para un periodo de retorno de 10 años se implantará los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Las precipitaciones registradas pertenecen a la estación meteorológica UCUBAMBA de ETAPA EP y la lluvia de diseño se obtiene a partir de la curva IDF para la localidad, emitida por el INAMHI (2019) para una duración de 60 minutos, con un intervalo de tiempo de cinco minutos, la ecuación es la siguiente:

$$I = 201.93 \cdot T^{0.1845} \cdot t^{-0.4926} \quad [mm/h]$$

Donde:

I: Intensidad en mm/h.

T: Periodo de retorno en años.

t: Intervalo de lluvia en minutos.

Lluvias registradas

- 10 de marzo de 2017

Hora	Precipitaciones [mm]	Intensidad [mm/h]
14:30	0	0
14:35	1.6	19.2
14:40	7.9	94.8
14:45	6.5	78
14:50	4.7	56.4
14:55	1.4	16.8
15:00	0	0

Tabla 8. Evento 10 marzo de 2017. Fuente: Estación Ucubamba - ETAPA EP

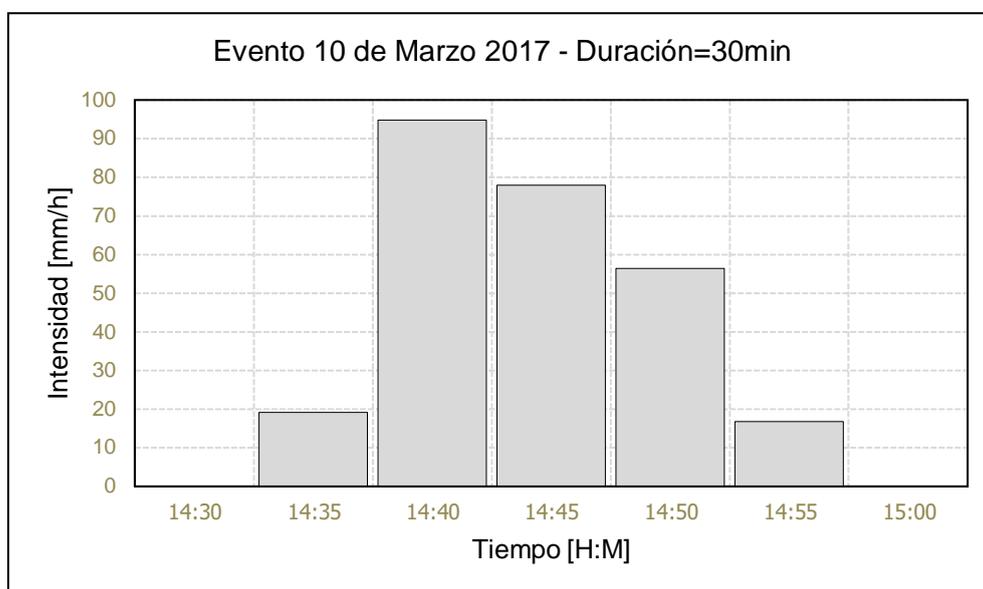


Figura 59. Hietograma de evento 10 de marzo de 2017. Fuente: Estación Ucubamba - ETAPA EP

- 25 de enero del 2020

Hora	Precipitaciones [mm]	Intensidad [mm/h]
14:45	0	0
14:50	0.1	1.2
14:55	0.1	1.2
15:00	0.1	1.2
15:05	0.2	2.4

15:10	0.1	1.2
15:15	0	0
15:20	0.7	8.4
15:25	8.3	99.6
15:30	3.9	46.8
15:35	0.4	4.8
15:40	0.1	1.2
15:45	0.1	1.2

Tabla 9. Evento 25 de enero de 2020. Fuente: Estación Ucubamba - ETAPA EP

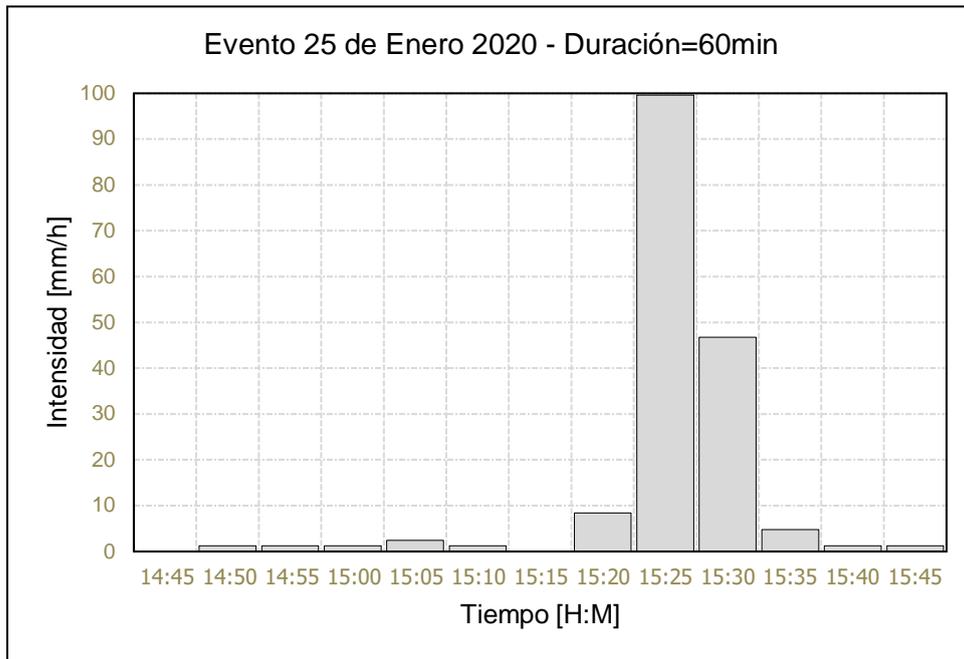


Figura 60. Hietograma de evento 25 de enero de 2020. Fuente: Estación Ucubamba - ETAPA EP

3.3 Procesamiento de datos

3.3.1 Subcuencas de aporte

Se realiza una división de la cuenca hidrológica principal en áreas menores de aporte, con la finalidad de disminuir el efecto de la variabilidad espacial en la topografía, red de drenaje, impermeabilidad, características del suelo y conexiones a la red de drenaje, al momento de generar la escorrentía. Valbuena (2016) menciona que, la delimitación perfecta de las subcuencas sería dividir la superficie en tantas subcuencas como puntos de conexión a la red de drenaje existan; esto implicaría tener en cuenta cada uno de los imbornales en las calles y asociarles a estos el área que genera la escorrentía que estos van a captar. En muy pocas ocasiones se modela las subcuencas urbanas a este nivel de detalle, ya que estas serían de tamaño muy reducido y alargarían notablemente el proceso de modelización. En el presente trabajo la delimitación que se ha llevado a cabo es considerar como subcuenca parte del área que divide a la manzana urbanística por una bisectriz que aporta a un punto

de salida más bajo de la red pública resultado del escurrimiento superficial de calles, aceras, cubiertas, terrazas y patios. En la siguiente figura se esquematiza el proceso de drenaje a un punto más bajo.

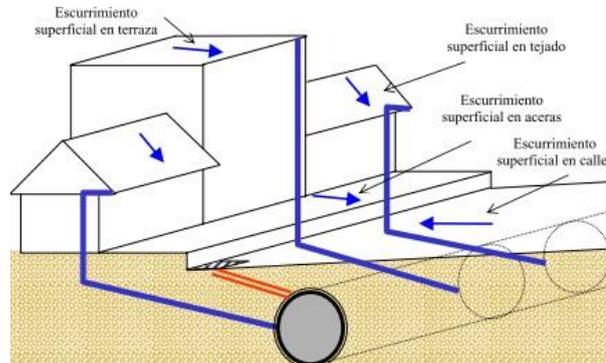


Figura 61. Esquema de proceso de escurrimiento hacia un pozo de registro. Fuente: (Gómez, 2007)

Con la topografía de la zona, se ha limitado las fronteras de drenaje para cada subcuenca, obteniendo una división de 18 subcuencas. En la siguiente figura se presenta la división de la cuenca principal.

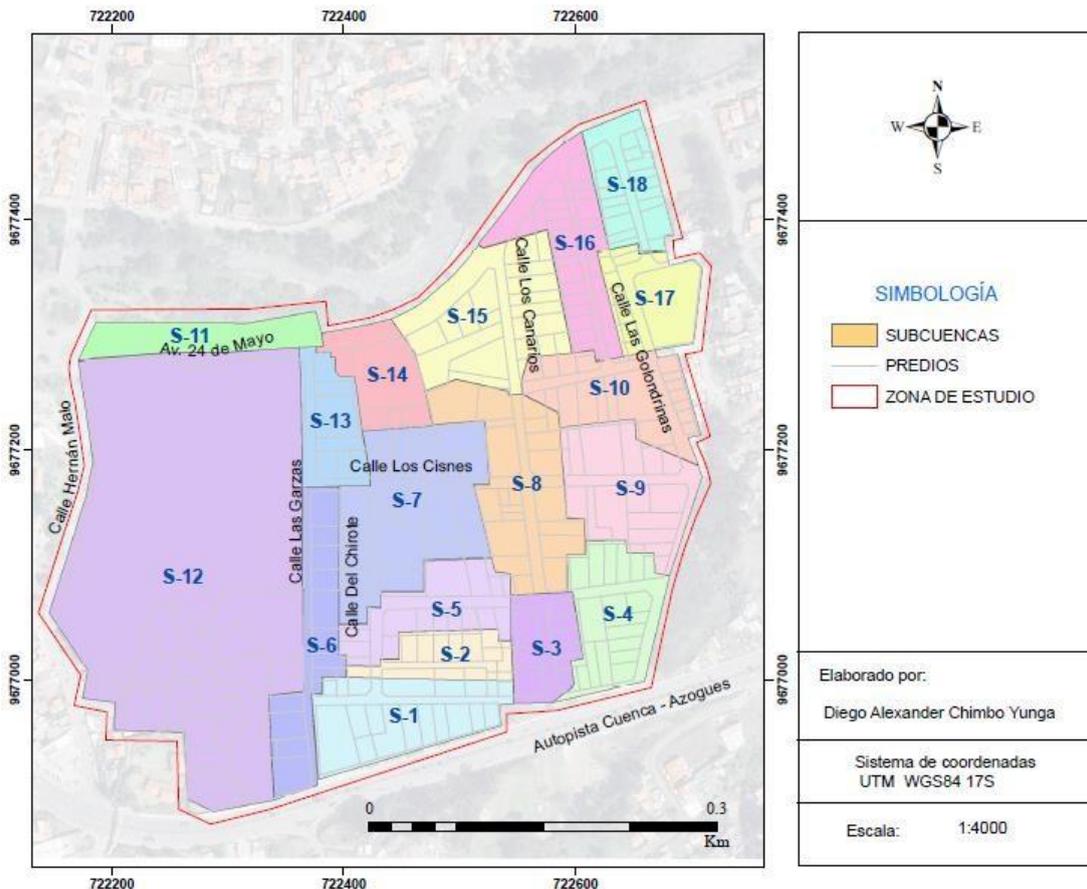


Figura 62. Mapa de discretización de subcuencas de aporte. Fuente: (Elaboración propia)

3.3.2 Pendientes

Este parámetro se logra obtener a partir del modelo digital de elevación (MED). En la siguiente figura se presenta el mapa de pendientes obtenido, haciendo uso de herramientas geoestadísticas del sistema de información geográfica.

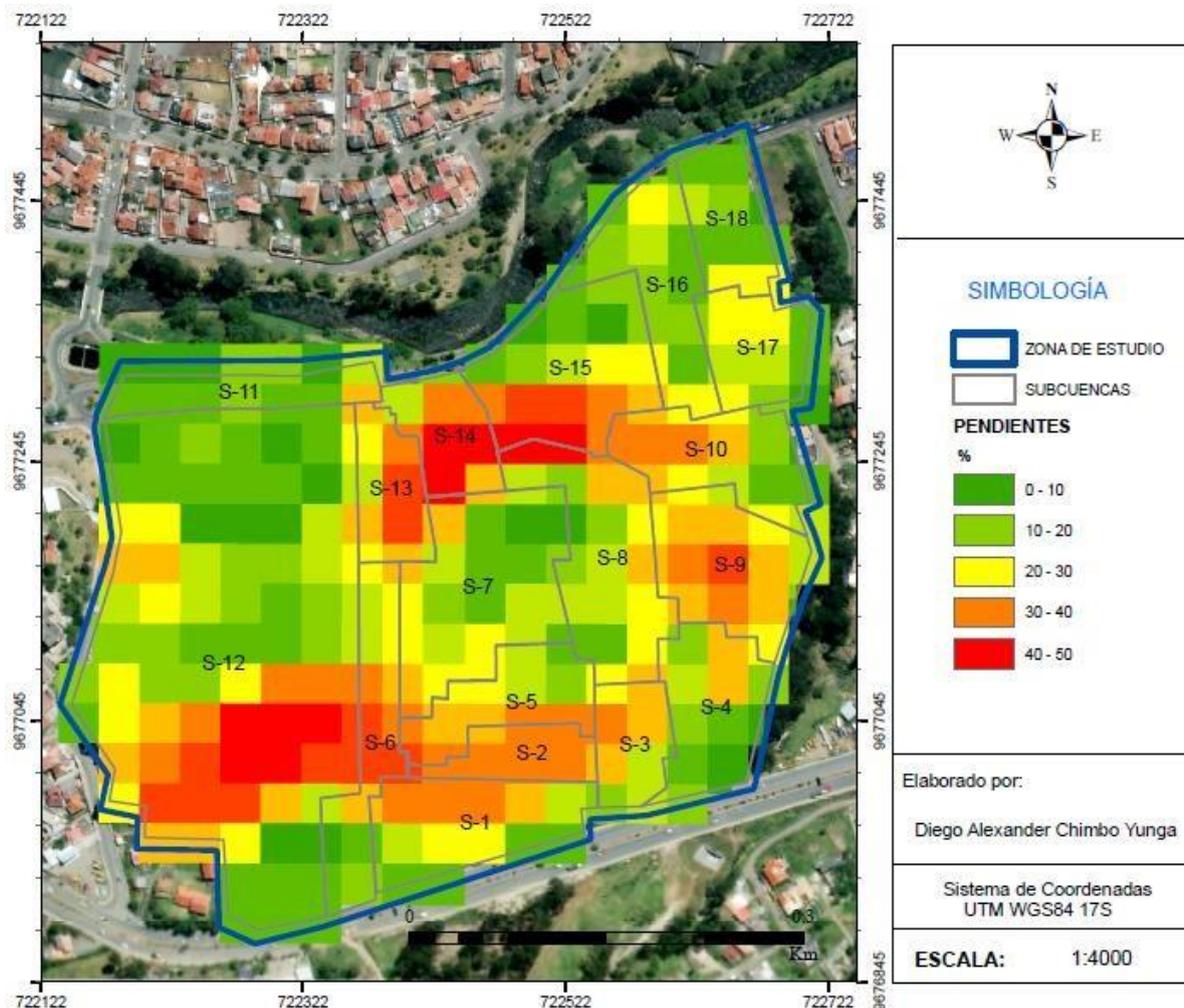


Figura 63. Mapa de pendientes de la zona de estudio. Fuente: (Elaboración propia)

3.3.3 Clasificación de superficies permeables e impermeables

Para determinar este parámetro cada subcuenca de aporte es dividida en cuatro tipos de superficies, considerando como superficies impermeables a las áreas como: calles, cubiertas, patios/parqueaderos que representan el 65% de impermeabilidad de la cuenca principal. En la siguiente figura muestra el porcentaje que ocupa cada superficie en el área de análisis.

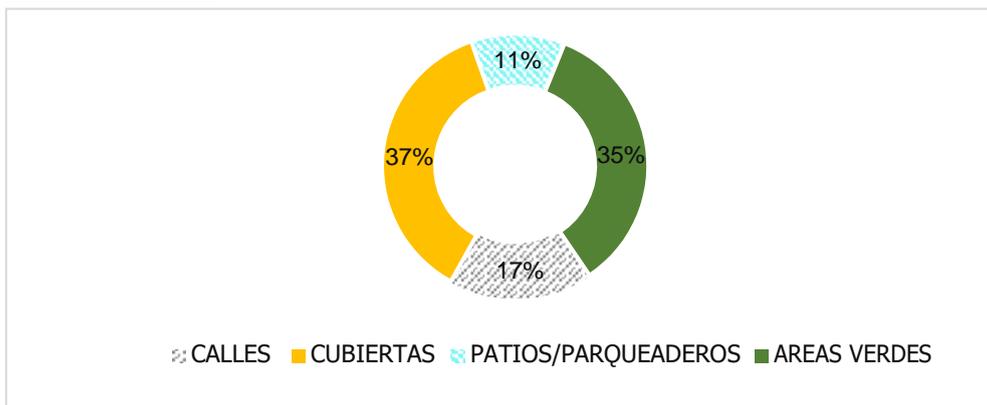


Figura 64. Clasificación de superficies de la zona de estudio

Cada subcuenca de aporte se divide en las diferentes superficies, como se muestra en el siguiente gráfico la división de superficies impermeables a partir de la imagen satelital de Google maps. El resumen de valores obtenidos se describe en el Anexo A.1.

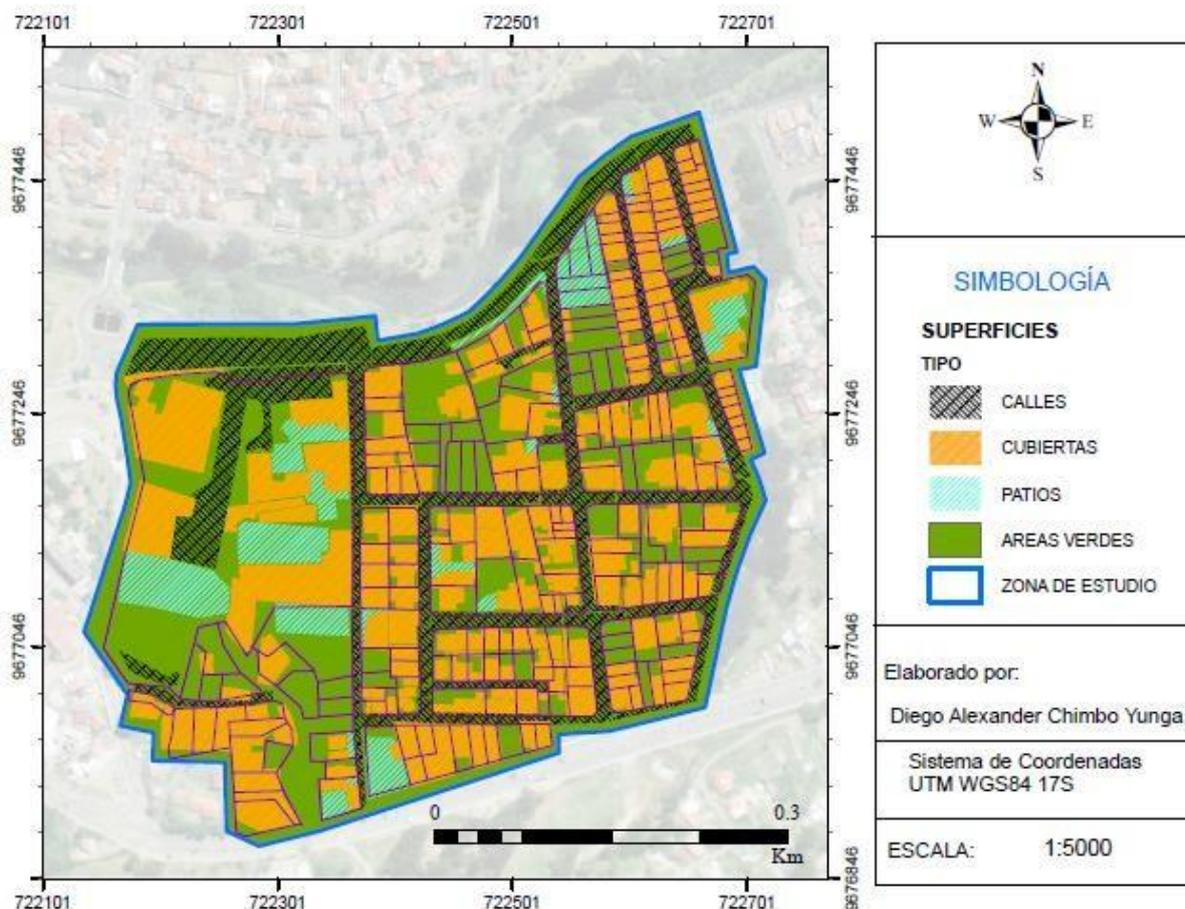


Figura 65. Mapa de clasificación de superficies permeables e impermeables de la zona de estudio. Fuente: (Elaboración propia)

3.3.4 Coeficientes de rugosidad

Este parámetro se establece a partir de las recomendaciones del manual de SWMM 5.2, ajustando para los diferentes tipos de superficies clasificadas. Para cada subcuenca se determina un coeficiente ponderando de acuerdo al área que ocupa.

$$n = \frac{\sum n_i \cdot A_i}{A}$$

Donde:

n: Coeficiente de rugosidad de Manning ponderado para la subcuenca.

n_i: Coeficiente de rugosidad de Manning de acuerdo a la tipología de superficie.

A_i: Área que corresponde a la tipología de superficie.

A: área total impermeable de la subcuenca.

En la siguiente tabla se expone los valores de **n** de Manning empleados.

Factor de rugosidad	
	n
Calles	0.015
Cubiertas	0.012
Patios/Parqueaderos	0.014

Tabla 10. Factores de rugosidad considerados en SWMM. Fuente: (L. Rossman, 2015)

El coeficiente n de Manning para el flujo superficial sobre el área permeable, se adopta de 0.13 para todas las subcuencas, valor recomendado por el manual de EPA SWMM 5.2, considerando como terrenos naturales con poca vegetación.

3.3.5 Almacenamiento en depresión

En muchos casos se utiliza como un parámetro de calibración en los modelos de cálculo puesto que, su estimación es muy difícil. SWMM 5.2 permite asignar diferentes valores de almacenamiento en depresiones del terreno a las áreas permeables e impermeables, incluso dentro de ellas indicar el porcentaje de área sin pérdidas de este tipo (%Zero-Imperv). Por razones de simplicidad y a falta de datos específicos se establece el mismo valor para todas las subcuencas de acuerdo a la siguiente tabla recomendada.

Tipo de terreno	Retención total	Valor recomendado
IMPERMEABLE		
Viales y áreas pavimentadas	1.3 - 3.8	2.5
Tejados planos	2.5 - 7.5	2.5

Tejados inclinados	1.3 - 2.5	1.2
PERMEABLE		
Césped	5 - 12.5	8 - 9
Áreas de arbolado	5 - 15.2	10

Tabla 11. Almacenamiento en depresiones (valores en mm). Fuente (Gómez, 2007)

3.3.6 Profundidad de infiltración

En el presente trabajo se utiliza el método de *Curve Number (CN)* del SCS (Soil Conservation Service) ahora conocido como NRCS (Natural Resource Conservation Service). Para cada subcuenca se determina un CN ponderando de acuerdo al área que ocupa cada tipología de superficie clasificada.

$$CN = \frac{\sum CN_i \cdot A_i}{A}$$

Donde:

CN: Numero de curva ponderado de la subcuenca.

CN_i: Numero de curva de acuerdo a la tipología de superficie.

A_i: Área que corresponde a la tipología de superficie.

A: área total de la subcuenca.

En base a la geología de la cuenca principal, se estima el grupo de suelo como C, con una conductividad hidráulica moderada. A partir del grupo de suelo, se ajusta al Número de Curva con valores que recomienda el manual de SWMM 5.2. En la siguiente tabla se presenta los valores empleados en la construcción del modelo.

USO DE SUELO	
	CN
Calles	98
Cubiertas	95
Patios/Parqueaderos	98
Áreas verdes	74

Tabla 12. Valores empleados para pérdidas por infiltración. Fuente (L. Rossman, 2015)

El resumen de los parámetros determinados para cada subcuenca se describe en los Anexos A.2 y A.3.

3.3.7 Caudal de aporte de aguas residuales

Se realiza una estimación de caudales residuales para la correcta simulación de la red de drenaje previo a la tormenta de lluvia, debido que es un sistema combinado en casi su totalidad. El caudal de aguas residuales comprende la suma de caudales domésticos

debidamente mayorado, caudales industriales, caudales por infiltración y caudales por conexiones erradas.

$$Q_{A.R} = Q_{MD} \cdot M + Q_{Inf} + Q_{Ind} + Q_{Erradas}$$

Donde:

$Q_{A.R}$: Caudal de aguas residuales.

Q_{MD} : Caudal medio diario doméstico.

M : Factor de mayoración

Q_{Inf} : Caudal por infiltración

$Q_{Erradas}$: Caudal por conexiones erradas.

Caudal medio diario doméstico Q_{MD}

$$Q_{MD} = Q_{residencial} + Q_{comercial} + Q_{institucional}$$

Caudal residencial ($Q_{residencial}$)

$$Q_{residencial} = \frac{Dotación \cdot Población \cdot R}{86400} [l/s]$$

Dotación: Se adopta el valor de 253 l/hab/día, según la dotación para el año 2020 de los Planes Maestros III de ETAPA EP.

Población: Se estima la población de manera indirecta, en base al número de conexiones de agua potable y tomas eléctricas para cada predio. Además, según el INEC 2010, para la ciudad de Cuenca el promedio de grupo familiar en zonas urbanas es de cuatro personas.

Coefficiente de retorno R: Se adopta el valor de 0.85

Caudal comercial ($Q_{comercial}$)

El área de análisis no presenta gran cantidad de comercios, razón por la cual no se considera como un aporte comercial sino como una contribución residencial.

Caudal institucional ($Q_{institucional}$)

Se adopta el valor de 0.4 l/s-Ha, según la EMAAP – Q.

Caudal Máximo Horario Q_{MH}

$$Q_{MH} = Q_{MD} \cdot F$$

Factor de mayoración F: Permite mayorar el caudal medio diario ante horarios de máximo consumo de agua potable. La EMAAP – Q, establece un valor entre 1.43 – 2.66, se adopta el valor de 2.66 por razones de seguridad.

Caudal por infiltraciones Q_{Inf}

Se adopta el valor de 0.05 l/s-Ha, según la EMAAP – Q.

Caudal por conexiones erradas $Q_{Erradas}$

Se adopta el valor de 0.1 l/s-Ha, según la EMAAP – Q.

La tabla resumen de los valores adoptados para determinar el aporte de aguas residuales al sistema de drenaje se muestra a continuación.

Grupo Familiar INEC 2010	4	Habitantes
Dotación ETAPA 2020	253	l/día
Coefficiente de retorno R	0.85	
Coefficiente de Mayoración F	2.66	(EMAAP-Q)
Aporte $Q_{institucionales}$	0.4	l/s-Ha (EMAAP-Q)
Aporte $Q_{infiltraciones}$	0.05	l/s-Ha (EMAAP-Q)
Aporte $Q_{erradas}$	0.1	l/s-Ha (EMAAP-Q)

Tabla 13. Valores adoptados para contribuciones de aguas residuales

El resumen de los cálculos para cada tramo de aporte de la red de drenaje se presenta en el Anexo A.5 y Anexo A.6.

3.3.8 Lluvia de diseño $Tr = 10$ años

A partir de la ecuación de intensidades que el INAMHI presenta para la estación M0067, ubicado en el aeropuerto de la ciudad de Cuenca, estación más cercana a la zona de estudio, se obtiene la lluvia de diseño para un tiempo de 60 minutos. A continuación, se presentan los valores determinados y el hietograma de diseño obtenido por el método de bloques alternados.

Tiempo [min]	Intensidad [mm/h]
5	23.40
10	26.29
15	30.65
20	38.35
25	58.90

30	139.76
35	45.38
40	33.85
45	28.22
50	24.72
55	22.27
60	21.29

Tabla 14. Lluvia de diseño Tr = 10 años – duración 60 minutos. Fuente: (INAMHI, 2009)

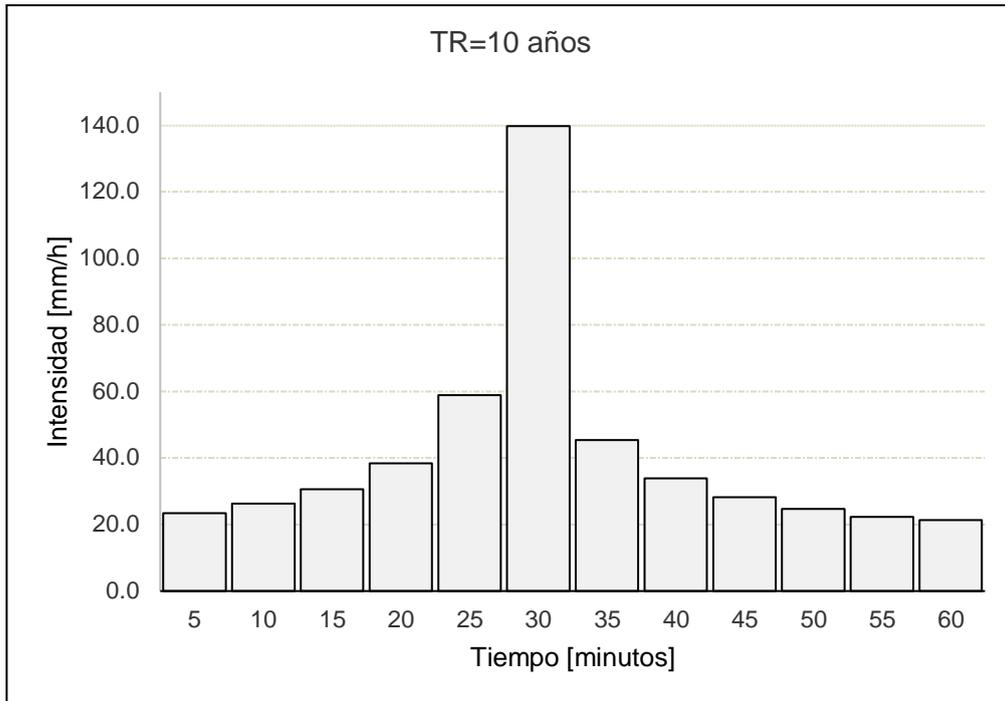


Figura 66. Hietograma de proyecto obtenido por el método de Bloques Alternados. Fuente: (Elaboración propia)

3.4 Modelación en SWMM 5.2

3.4.1 Subcuencas (Subcatchment)

Las propiedades y valores adoptados en el modelo son detalladas a continuación:

Property	Value
Name	S-1
X-Coordinate	722489.177
Y-Coordinate	9676967.171
Description	
Tag	
Rain Gage	LLUVIA-1
Outlet	N-C8
Area	1.04
Width	91.03
% Slope	11.091
% Imperv	82.9
N-Imperv	0.0128
N-Perv	0.13
Dstore-Imperv	2.5
Dstore-Perv	9
%Zero-Imperv	10
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	CURVE_NUMBER
User-assigned name of subcatchment	

Figura 67. Ventana del objeto subcuenca en SWMM 5.2

Name: Nombre de identificación para la subcuenca (**S-**)

Rain Gage: Pluviómetro que contiene la serie temporal de precipitaciones (**LLUVIA-1**)

Outlet: Pozo de registro de la red de drenaje que descarga la escorrentía superficial generada por la subcuenca (**N-C**)

Area: Área en hectáreas que comprende la subcuenca.

Width: Ancho aproximado de la subcuenca de drenaje. Se estima como la división del área entre la longitud de la subcuenca (se entiende como longitud de subcuenca desde el punto más alejado al punto de descarga).

%Slope: Comprende la pendiente media de la subcuenca.

%Imperv: Representa el porcentaje de impermeabilidad de la subcuenca.

N-Imperv: Coeficiente *n* de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable de la subcuenca

N-Perv: Coeficiente n de Manning para el flujo superficial sobre el área permeable de la subcuenca.

Dstore-Imperv: Altura de almacenamiento en depresión sobre el área impermeable.

Dstore-Perv: Altura de almacenamiento en depresión de áreas permeables.

%Zero-Imperv: Porcentaje de área impermeable que no presenta almacenamiento en depresión. Este parámetro es estimado según la cobertura impermeable de la subcuenca.

Subarea Routing: Selección del sentido de flujo interno entre las áreas impermeable y permeable de la subcuenca. *Imperv:* flujo desde lo permeable a impermeable; *Perv:* flujo desde lo impermeable a permeable; *Outlet:* ambas áreas aportan directamente a la descarga. Se selecciona la opción *Outlet* para todas las subcuencas.

Percent Routed: Porcentaje de escorrentía entre las distintas subcuencas. Se adopta el valor de 100 para todas subcuencas.

Infiltration Data: Selecciona el método de infiltración a emplear en el modelo.

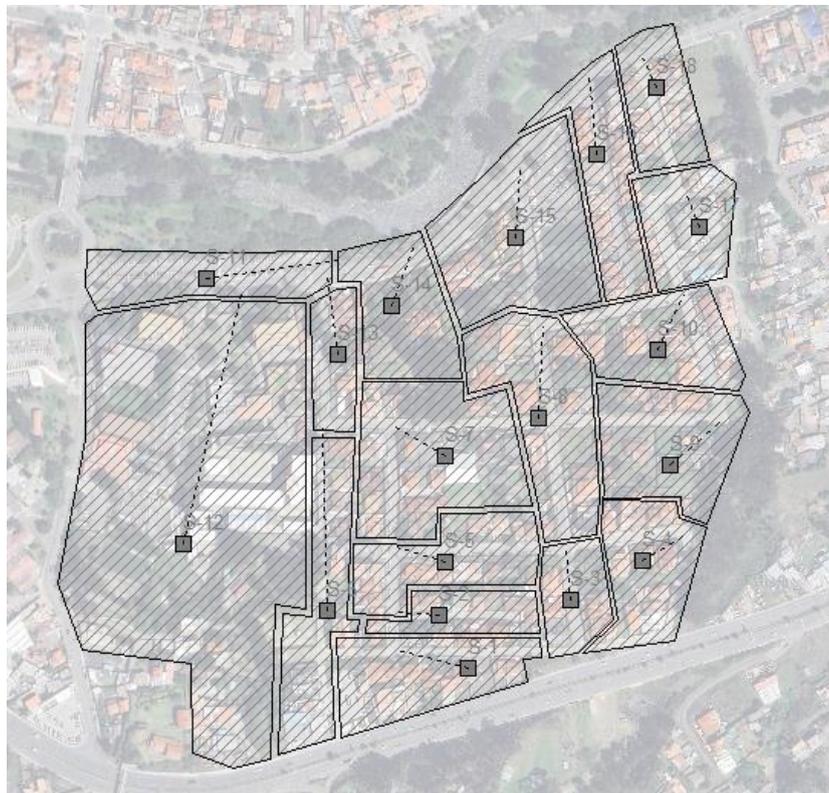


Figura 68. División de subcuencas en SWMM5.2

3.4.2 Pozos de registro (Junction Node)

Corresponde a los pozos de registro de la red de drenaje, las mismas que fueron facilitadas a través del catastro de ETAPA EP. Las propiedades del elemento nodo se presenta en la siguiente figura.

Junction N-C8	
Property	Value
Name	N-C8
X-Coordinate	722430.846
Y-Coordinate	9676983.056
Description	
Tag	
Inflows	YES
Treatment	NO
Invert El.	2541.5
Max. Depth	2.1
Initial Depth	0
Surcharge Depth	0
Ponded Area	0
User-assigned name of junction	

Figura 69. Ventana del objeto Junction

Name: Nombre que se le asigna a cada nodo o pozo de registro de la red de drenaje. Se adopta la siguiente nomenclatura: *N-C* corresponde a los pozos de registro del sistema combinado, *N-S* corresponde a los pozos de registro del sistema sanitario, *N-P* corresponde a los pozos de registro del sistema pluvial.

X - Coordinate: Coordenadas *este* del pozo de registro.

Y - Coordinate: Coordenadas *norte* del pozo de registro.

Inflows: Corresponde a los caudales circulantes en el nodo antes de la tormenta. La mayor parte de la red de drenaje es un sistema combinado, razón por la cual se debe estimar el aporte de caudales residuales.

Una vez determinado los caudales residuales se coloca en cada tramo, en el pozo de registro aguas arriba. En la siguiente figura se presenta el lugar a colocar el aporte de aguas residuales en SWMM 5.2.

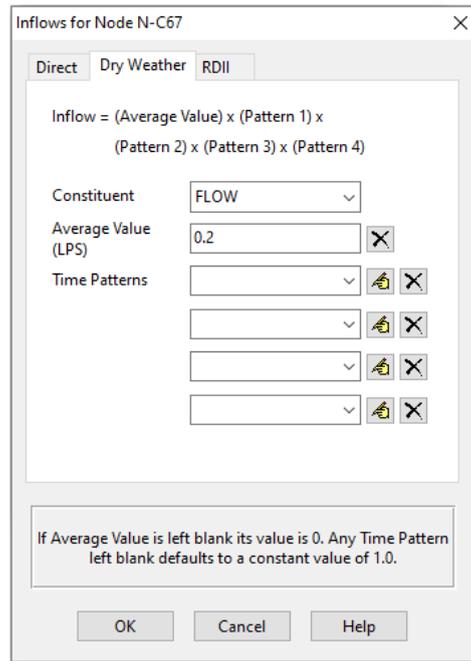


Figura 70. Ventana para adicionar caudales de aguas residuales en SWMM 5.2

Invert Elevation: Corresponde a la cota de fondo del pozo de registro, como se muestra en la siguiente figura, este valor se obtiene a partir de catastro de ETAPA EP.

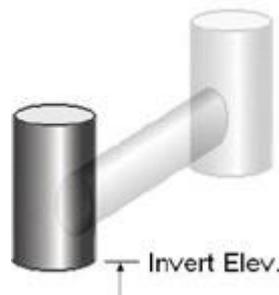


Figura 71. Esquema de Invert Elev

Max Depth: Corresponde a la altura del pozo de registro, este valor se obtiene a partir de catastro de ETAPA EP.

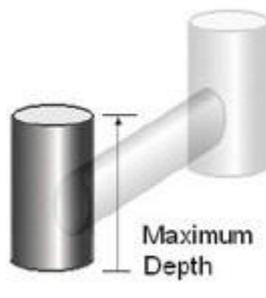


Figura 72. Esquema de Max. Depth

Outfall: Representa los nodos de salida de la red de drenaje. En la cuenca de análisis se ha identificado dos puntos de descarga, a la altura de la Av. 24 de Mayo y la calle Manuel Alejandro Niveló.

3.4.3 Tuberías (Conduit link)

Las propiedades y valores se presentan en la siguiente figura.

Property	Value
Name	C-10
Inlet Node	N-C8
Outlet Node	N-C13
Description	
Tag	
Shape	CIRCULAR
Max. Depth	0.3
Length	30.56
Roughness	0.015
Inlet Offset	0
Outlet Offset	0.2
Initial Flow	0

Height of conduit invert above node invert at inlet end (m)

Figura 73. Ventana del objeto Conduit

Name: La nomenclatura que se le asigna a cada conducto es **C-**.

Inlet Node: Representa el pozo de registro de salida de la tubería.

Outlet Node: Representa el pozo de registro de llegada de la tubería.

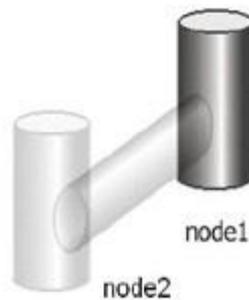


Figura 74. Inlet Node (node 1) – Outlet Node (node 2)

Shape: Forma del conducto, se selecciona como circular.

Max. Depth: Representa el diámetro de la tubería.

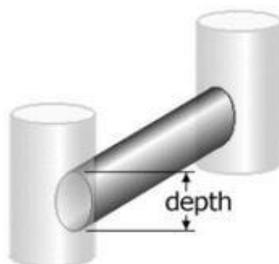


Figura 75. Esquema de la propiedad diámetro (Depth).

Length: Longitud de la tubería desde el pozo de registro de entrada hasta el pozo de registro de salida.



Figura 76. Esquema de la longitud de la tubería.

Roughness: Representa la rugosidad de la tubería, este valor se ajusta en base a los valores recomendados por el manual de EPA SWMM 5.2. para tuberías de PVC se tiene n-Manning de 0.011 y para tuberías de Hormigón Simple (HS) se tiene n-Manning de 0.015.



Figura 77. Esquema de la rugosidad que presenta el conducto.

Inlet Offset: Es la altura respecto a la cota de fondo del pozo de registro de salida de la tubería.

Outlet Offset: Es la altura respecto a la cota de fondo del pozo de registro de llegada de la tubería.



Figura 78. Esquema de alturas de salidas y llegadas de la tubería en los pozos de registro.

3.4.4 Pluviógrafo (Rain Gage)

Contiene la lluvia a descargar en las subcuencas, las propiedades y valores de la ventana Rain Gage se presenta en la siguiente figura.

Property	Value
Name	LLUVIA-1
X-Coordinate	722382.282
Y-Coordinate	9677359.025
Description	
Tag	
Rain Format	INTENSITY
Time Interval	0:05
Snow Catch Factor	1.0
Data Source	TIMESERIES
TIME SERIES:	
- Series Name	Tr=10años-60min
DATA FILE:	
- File Name	
- Station ID	*
- Rain Units	MM
Station ID for user-prepared file format	

Figura 79. Ventana del objeto Pluviógrafo

Name: nombre del pluviógrafo, que estará vinculada a cada subcuenca.

Rain Format: permite ingresar los datos de lluvia en forma de volumen (mm) o intensidad (mm/h).

Time Interval: intervalo de tiempo de captura de la lluvia.

Data Source: archivo que contiene la lluvia, puede ser un archivo externo o datos vinculados directamente en la serie de tiempo (time-series)

TIMESERIES (Series name): Nombre del archivo que contiene la lluvia.

DATAFILE (Rain units): Unidades de la serie temporal, puede estar en pulgadas (in) o en milímetros(mm). En el modelo se emplea el formato intensity (intensidad) en *mm/h*, por ello las unidades a trabajar será milímetros (*mm*).

3.4.5 Opciones de simulación

Asumiendo que, en su estado actual, el sistema de drenaje de la cuenca de análisis no es capaz de evacuar eficientemente la tormenta de proyecto de 10 años de periodo de retorno, donde, las tuberías entrarán en carga y el agua saldrá a la superficie. Considerando el posible flujo presurizado en las tuberías y la presencia de agua que sale desde los nodos, el único método que permite calcular estos procesos es la onda dinámica (Dynamic Wave); por tal motivo se empleará este método en el análisis.

En la siguiente figura se presenta las opciones generales de cálculo.

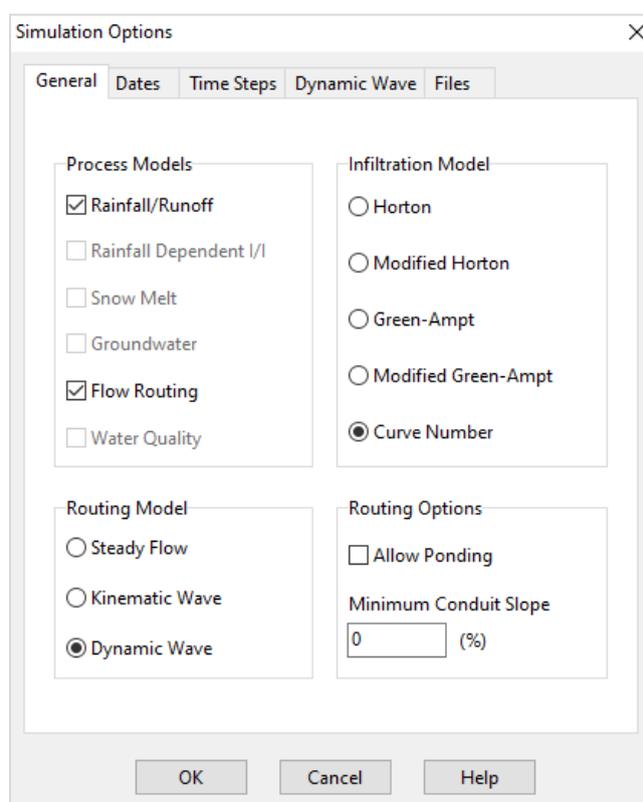


Figura 80. Opciones de cálculo en el modelo

En la opción *Date* se detalla la fecha de la simulación, hora de inicio (Start Analysis on), hora de inicio del reporte de resultados (Start Reporting on) y la hora de finalización de la simulación (End Analysis on) como se muestra en la siguiente figura.

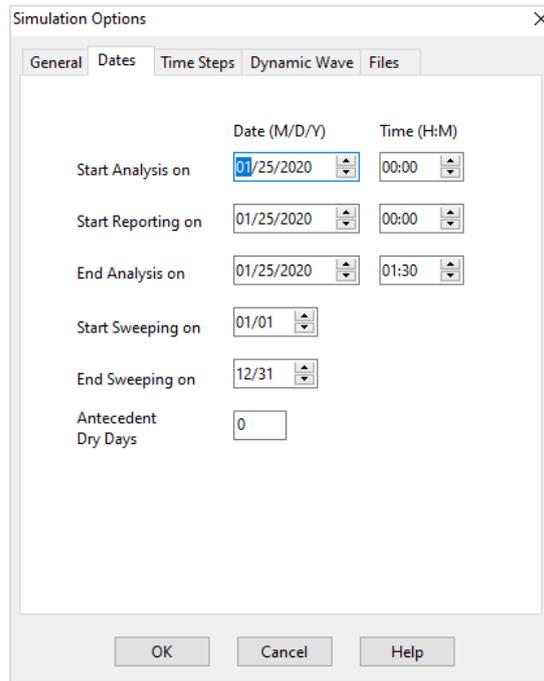


Figura 81. Configuración de fechas y horas de simulación

En la opción TimeSteps, se configura la hora de inicio del reporte (Reporting Step), para la escorrentía en tiempos secos (Runoff Step: Dry Weather) y en tiempos de lluvia (Runoff Step: Wet Weather). Se recomienda la configuración como se muestra en la siguiente figura.

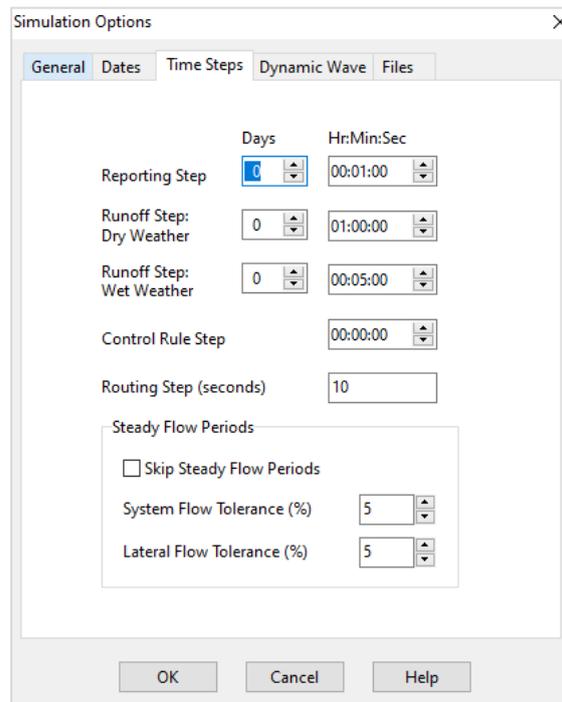


Figura 82. Configuración TimeSteps

Finalmente, en la opción Dynamic Wave, se configura las opciones de calculo que necesita SWMM5.2 para la simulación, las mismas que se presentan en la siguiente figura.

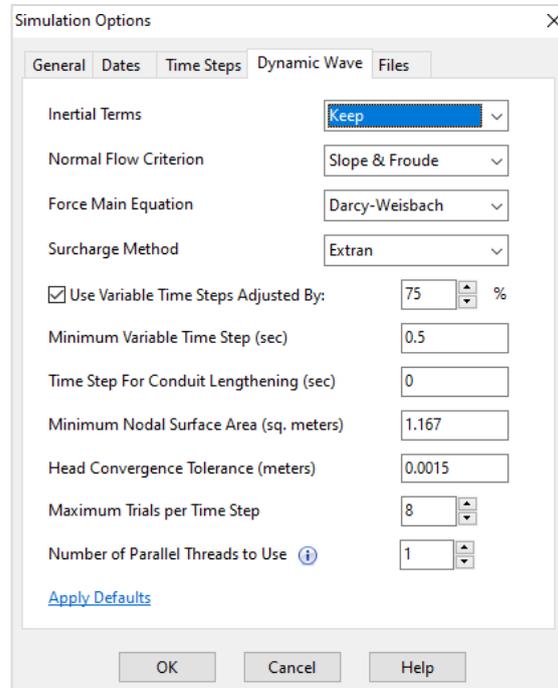


Figura 83. Opciones de cálculo por el método de la Onda Dinámica en SWMM5.2

3.5 Validación de la red de drenaje con eventos extremos registrados

3.5.1 Evento 10 de marzo de 2017

El evento tuvo una duración de 30 minutos, siendo el minuto 20 el más crítico, principalmente para los colectores de la Av. 24 de Mayo, en donde pierden notablemente su capacidad y existe la presencia de nodos inundados. En las figuras posteriores se muestra la respuesta de la red ante este evento suscitado.

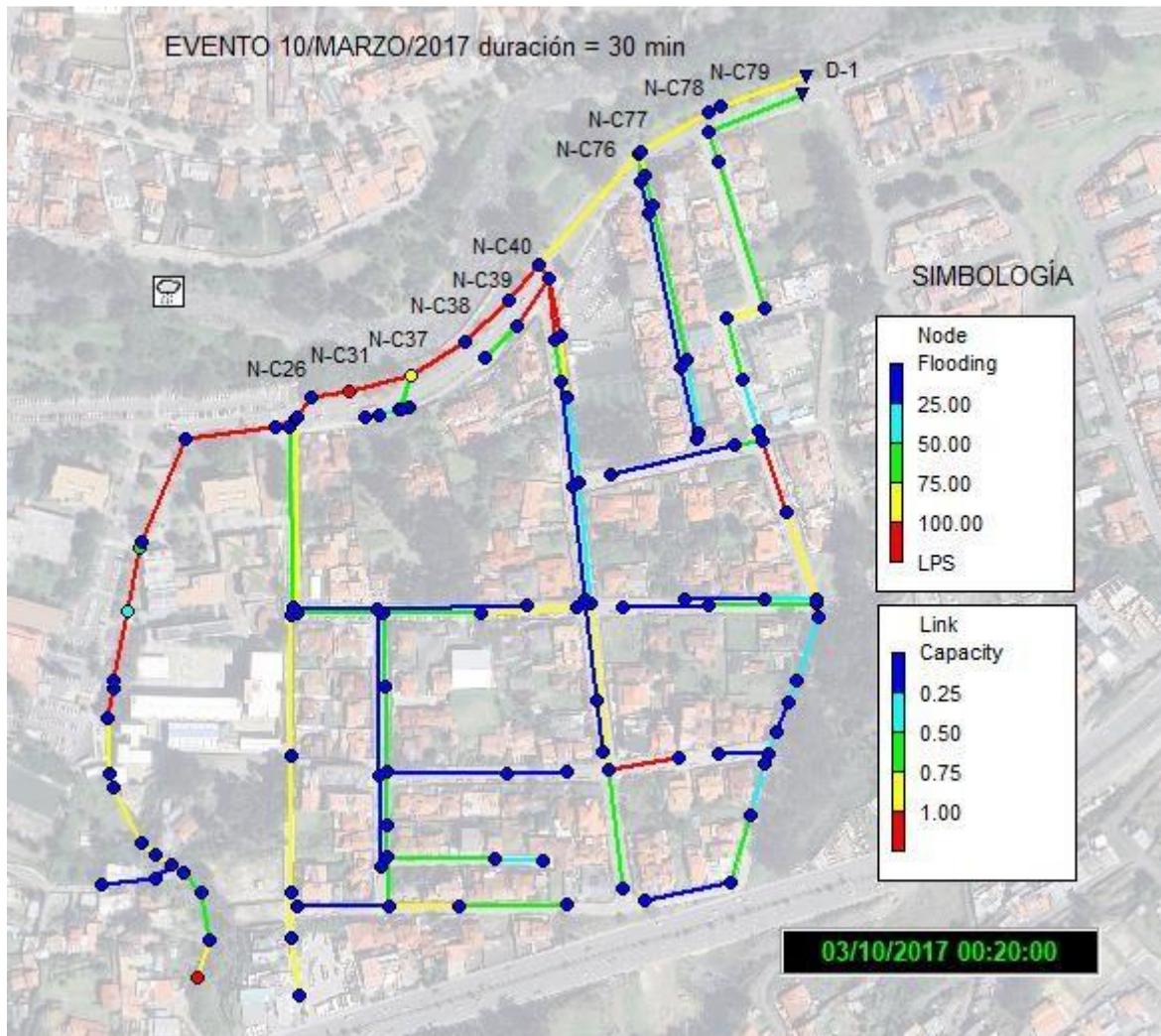


Figura 84. Representación de los colectores en carga y nodos inundados - Evento 10 de marzo de 2017 en SWMM 5.2

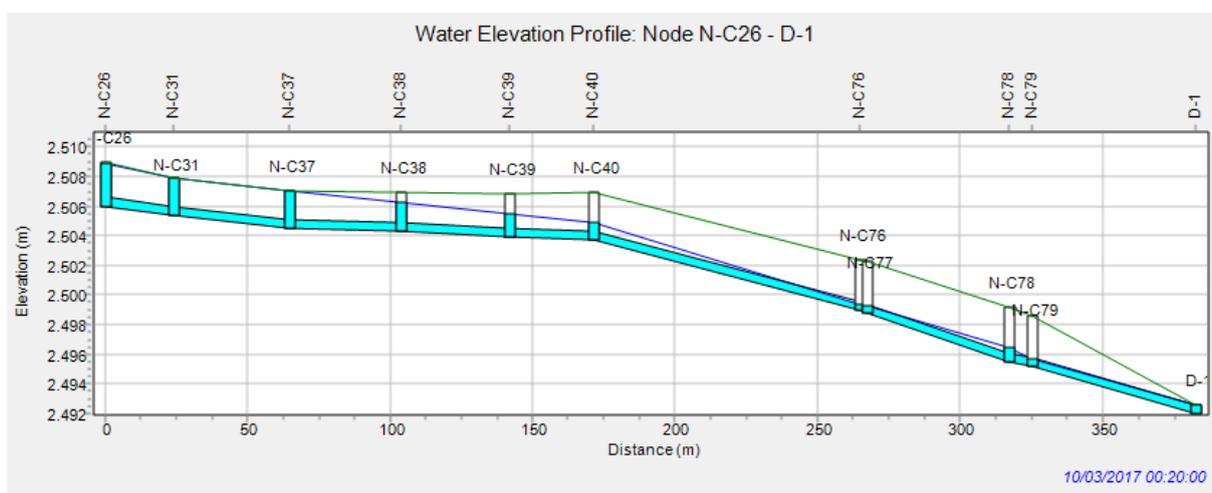


Figura 85. Vista de perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo - Evento 10 de marzo de 2017

3.5.2 Evento 25 de enero de 2020

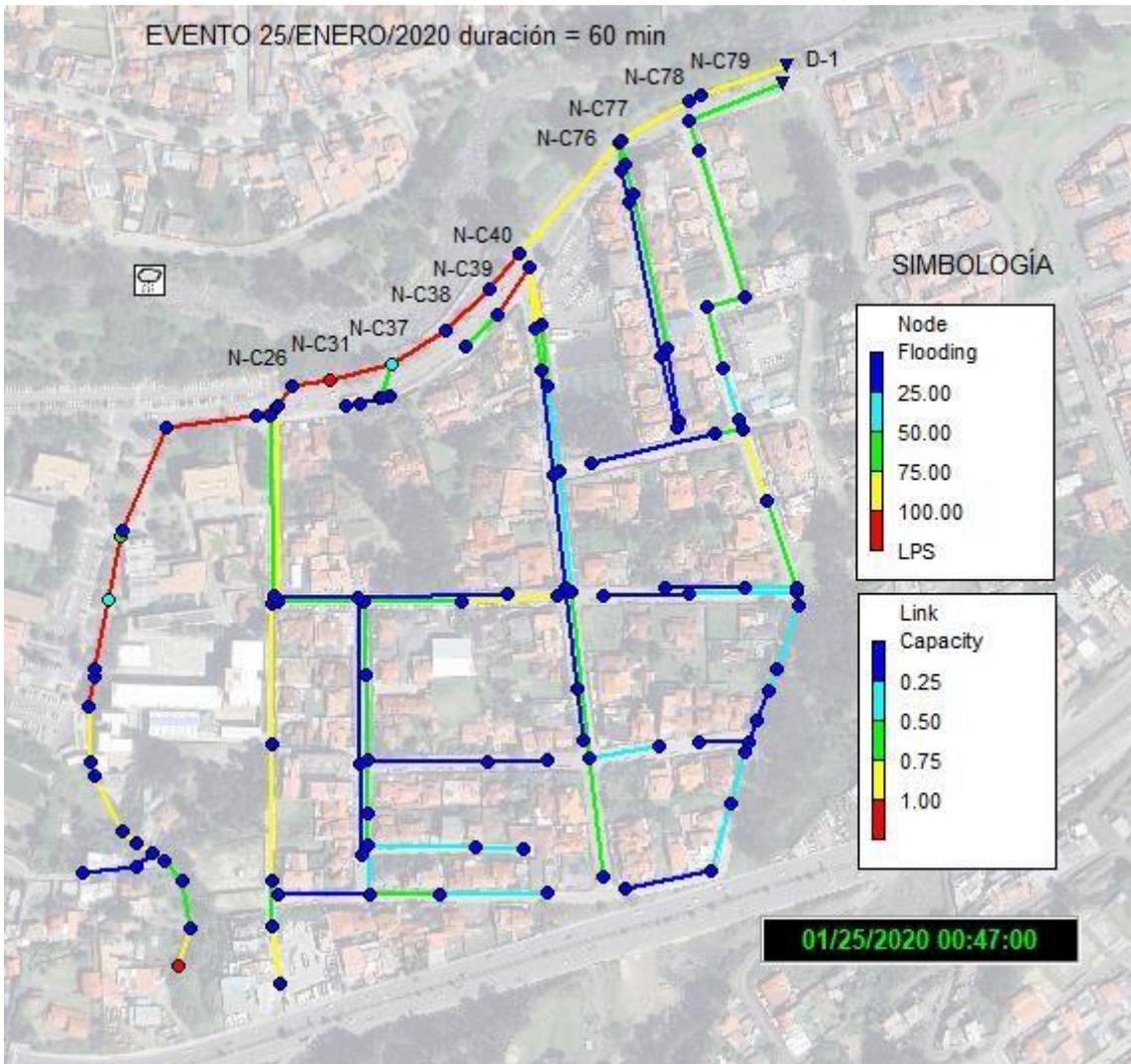


Figura 86. Representación de los colectores en carga y nodos inundados - Evento 25 de enero de 2020 en SWMM 5.2

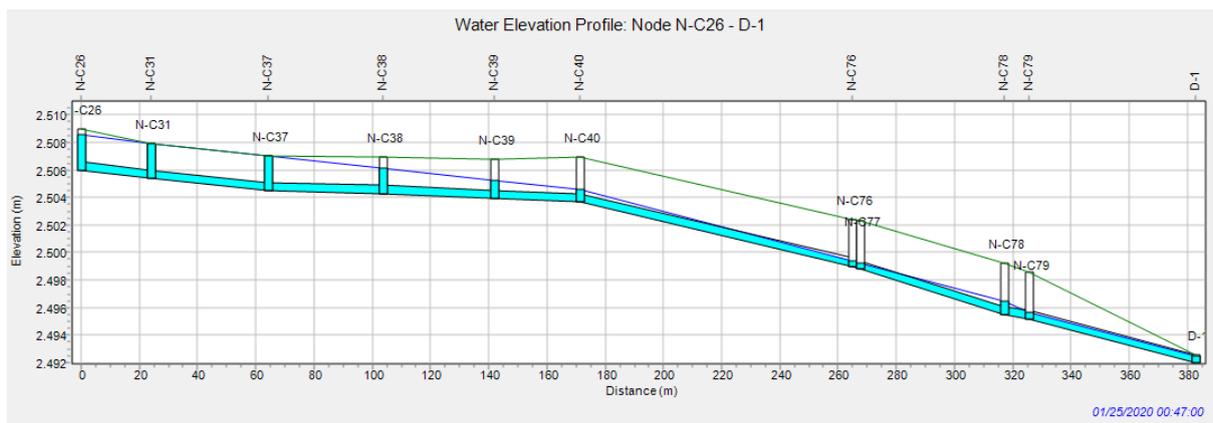


Figura 87. Vista de Perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo - - Evento 25 de enero de 2020

De acuerdo a las figuras 84, 85, 86 y 87, el estado actual de la red de drenaje de la zona de estudio, presenta deficiencias principalmente en la parte baja de la zona, es decir, los colectores que se encuentran en la Av. 24 de Mayo son los conductos más críticos de la red, en la mayoría de los tramos pierden su capacidad de transporte, es más, existe la presencia de nodos inundados. Por lo antes mencionado, los tramos de análisis serán los colectores de la Av. 24 de Mayo.

3.6 Implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

3.6.1 Escenario 0

En este escenario se verifica la respuesta de la red de drenaje para una lluvia de diseño de 60 minutos de duración con un período de retorno de 10 años, previo a la incorporación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. La lluvia de diseño será la lluvia base para los siguientes escenarios.

Resultados

En la figura 88, se presenta el resultado más desfavorable de la red de drenaje, que corresponde al minuto 35 luego del inicio de la tormenta.

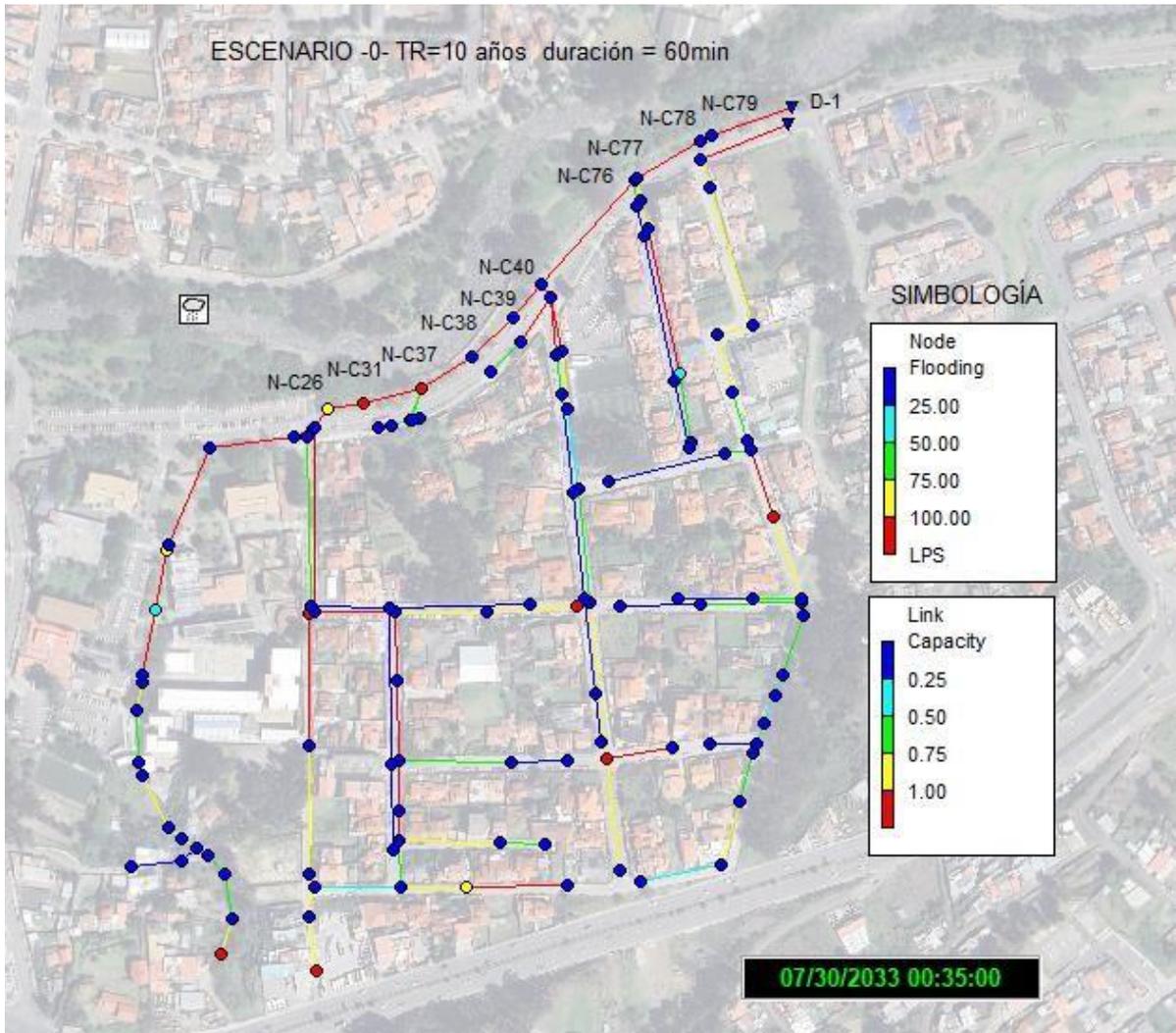


Figura 88. Representación de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en la zona de estudio (35 minutos después del inicio de la tormenta).

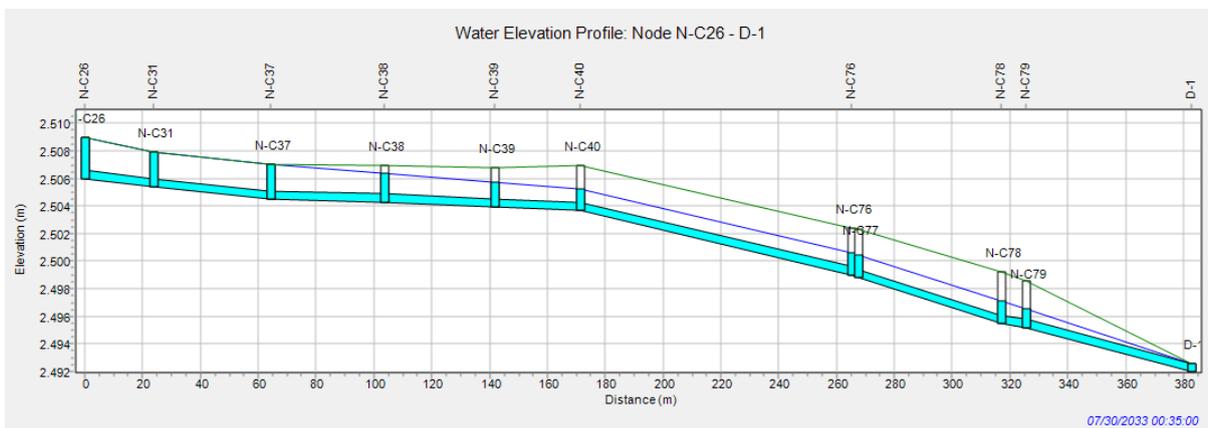


Figura 89. Vista de perfil de colectores de la Av. 24 de Mayo, en el momento más desfavorable luego del inicio de la tormenta.

Como se puede evidenciar el problema principal se encuentra en la Av. 24 de Mayo, en el que, para el minuto 35 de la tormenta, existen 12 pozos inundados, 3 de ellos se encuentran en la avenida 24 de Mayo y 37 del total de los colectores pierden capacidad de transporte, 10 de ellos se encuentran en la avenida 24 de Mayo. El problema reside en que, aun siendo un eje principal de la red que recolecta los caudales provenientes de las zonas altas de la cuenca, las dimensiones de los colectores no son mayores de manera significativa con respecto a las dimensiones del resto de la red de drenaje. A partir de este escenario se implantarán sistemas urbanos de drenaje sostenible, que logren mitigar eventos de esta magnitud.

3.6.2 Escenario 1 (Barriles de lluvia)

Selección y ubicación de SUDS.

En este escenario se propone implementar técnicas a nivel predial. Es decir, sistemas que pueden ser implantados en cada unidad de vivienda y que no necesite de un alto costo de adquisición y operación. Se propone ubicar barriles de lluvia, para almacenar parte o totalidad de la esorrentía de los tejados, desconectando la red de evacuación de agua lluvia al sistema de alcantarillado público, con el objetivo de atenuar el pico de esorrentía que llega a la red de drenaje convencional. La altura del barril propuesto es de 1000 mm, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 90. Barril de lluvia propuesto. Fuente:(Made-in-china, 2023)

La figura que se presenta a continuación, esquematiza el modo de uso en las viviendas.

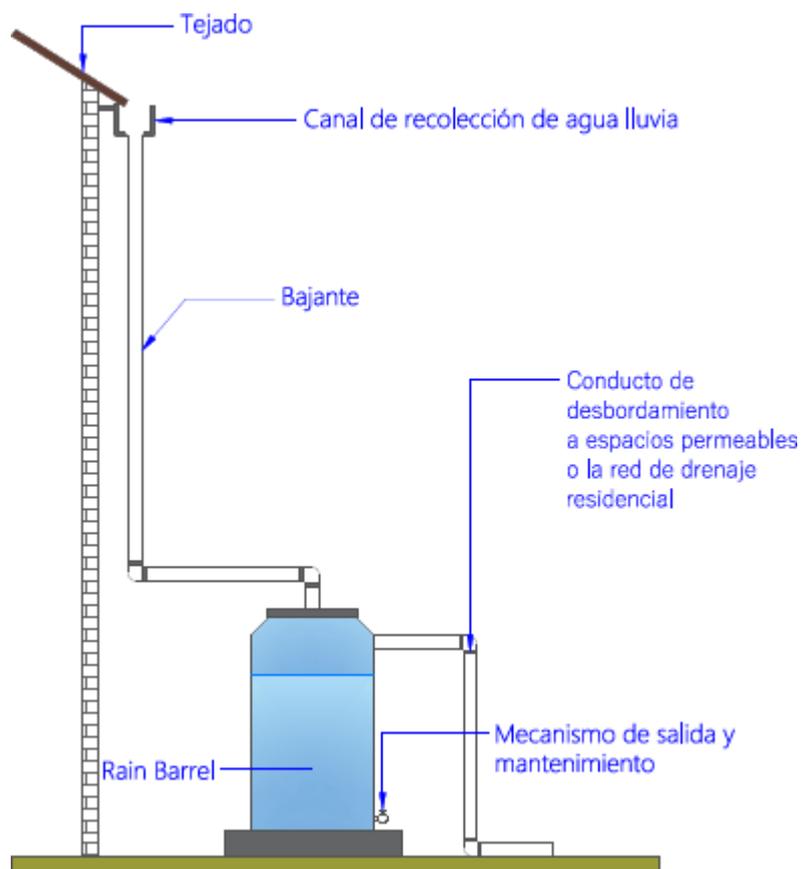


Figura 91. Modo de uso del barril de lluvia en las viviendas. Fuente: (Elaboración propia)

Implementación en el modelo

El software SWMM 5.2 permite modelar los sistemas urbanos de drenaje sostenible en la unidad LID Controls, del paquete de Hydrology en la pestaña principal de Project, como se muestra en la siguiente figura.

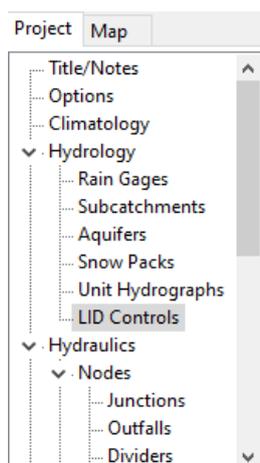


Figura 92. Unidad de LID Controls en SWMM5.2

Posteriormente se selecciona la tipología de LID a utilizar, desde la ventana LID Control Editor.

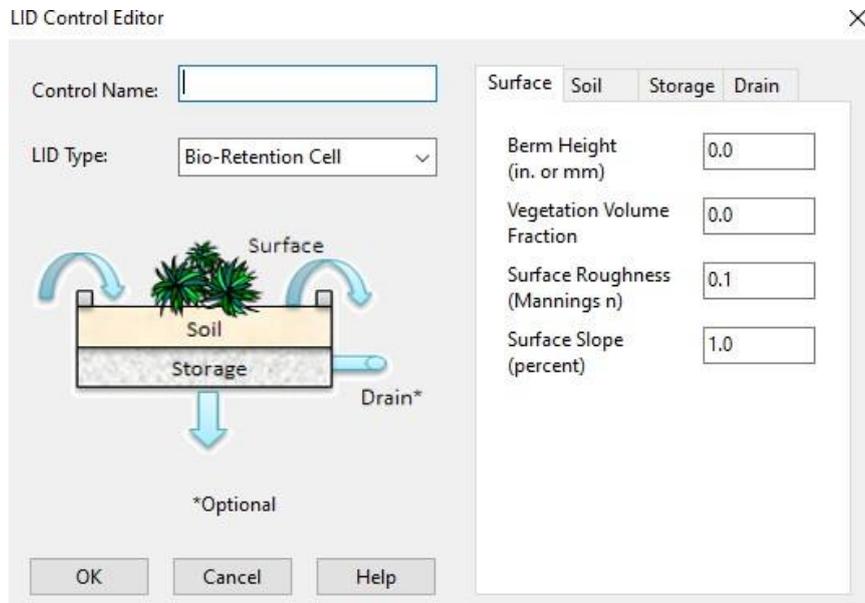


Figura 93. Ventana LID Control Editor

Como primer escenario se propone implementar barriles de lluvia de 1000 mm de altura, se considera un objeto adecuado en tamaño a implantar en las viviendas.

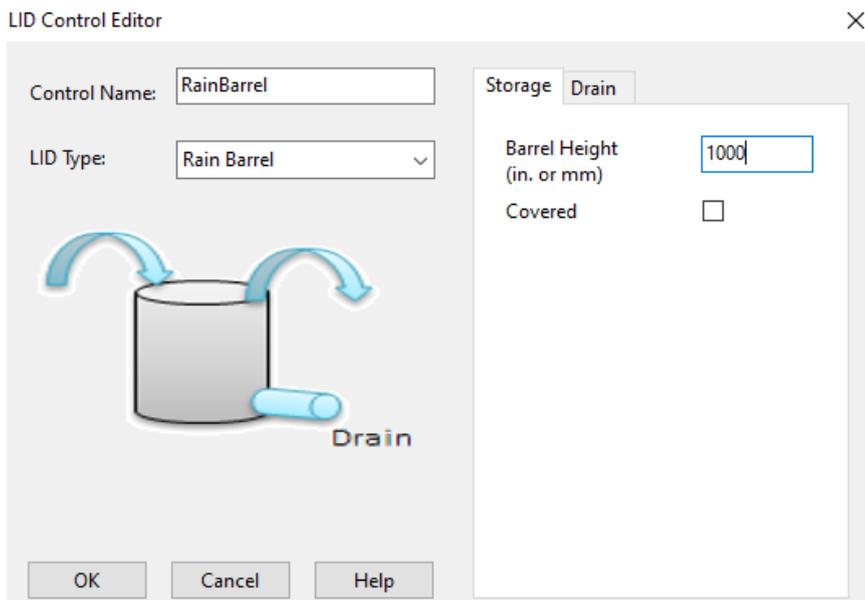


Figura 94. Configuración del barril de lluvia

Se considera en este escenario como un barril sin drenaje, únicamente de almacenamiento y en caso de colapsar será desbordado al área permeable. El coeficiente de flujo (Flow Coefficient) de coloca el valor de 0 porque no drena.

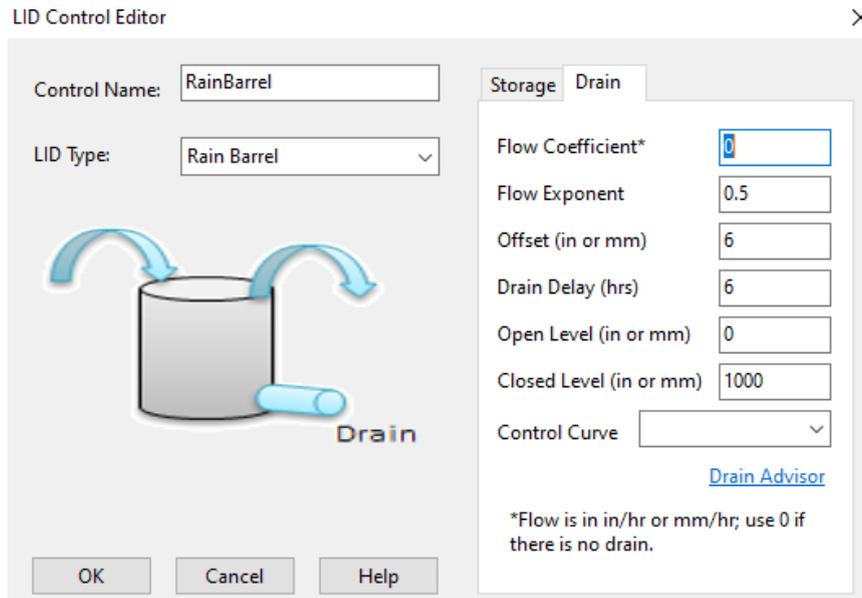


Figura 95. Configuración del parámetro de drenaje para el barril.

Una vez configurado el LID, en las propiedades de las subcuencas se dirige a la opción LID Control, como se presenta en la siguiente figura.

Subcatchment S-1	
Property	Value
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	1
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
N-Perv Pattern	
Dstore Pattern	
Infil. Pattern	

LID controls (click to edit)

Figura 96. Propiedades del objeto subcuenca

De acuerdo a las unidades LID creadas, se puede editar las características necesarias para el análisis, considerando que no debe superar el 100% la suma de la columna % *From Imperv.*

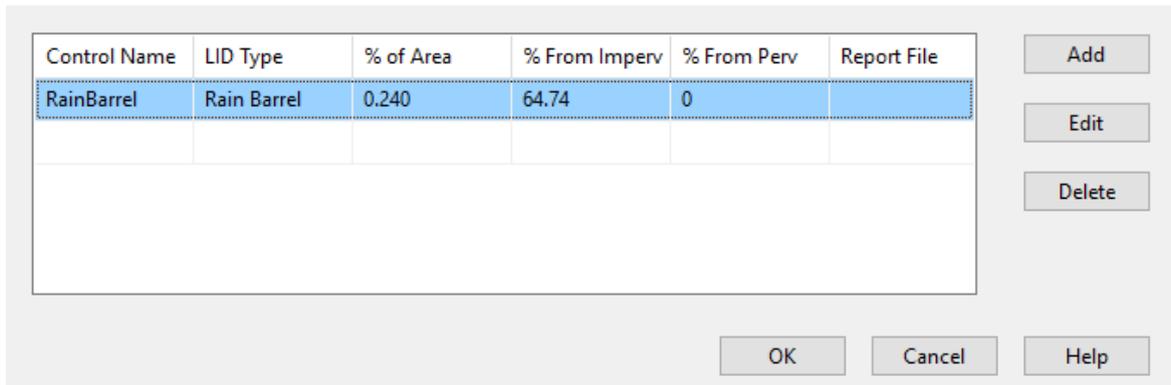


Figura 97. Ventana LID Controls for Subcatchment

Ingresando desde la opción *Edit* se visualiza la ventana LID Usage Editor, en la cual se configuran los diferentes valores de acuerdo al número de unidades LID a utilizar en la subcuenca. En la siguiente figura se presentan los valores a configurar tales como: área que ocupa la unidad LID (*Area of Each Unit*), número de unidades LID a utilizar (*Number of Units*), ancho que ocupa cada LID en la superficie de la subcuenca (*Surface Width per Unit*), porcentaje de área impermeable a tratar (*% of Impervious Area Treated*), porcentaje de área permeable a tratar (*% of Pervious Area Treated*), en caso que el agua retorne a la superficie permeable de la subcuenca se debe seleccionar la casilla *Return all Outflow to Pervious Area*.

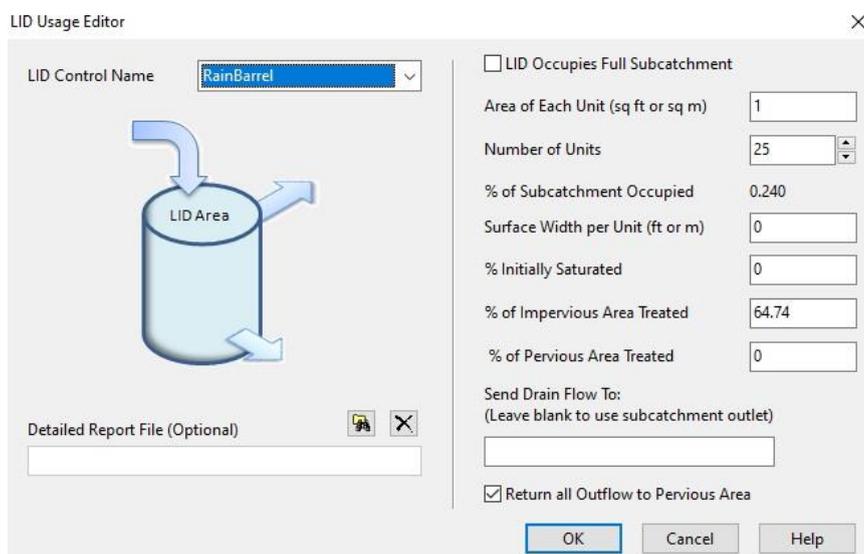


Figura 98. Ventana LID Usage Editor

Se debe recalcar que el porcentaje de área impermeable tratada (*% of Impervious Area Treated*), corresponde a la fracción del total del porcentaje impermeable de la subcuenca, es decir, si el porcentaje impermeable de la subcuenca es del 82.9%, y el porcentaje que corresponde a las áreas ocupadas por las cubiertas es del 53.67%, por lo tanto, 82.9%

SWMM5.2 le considera como un 100% de impermeabilidad a tratar, de éste valor se debe ajustar el porcentaje ocupado por las cubiertas, se debe realizar una regla de tres para el ajuste de este parámetro obteniendo 64.74% de área impermeable tratada. Además, se debe ajustar el parámetro *ancho (Width)* de cada subcuenca de acuerdo al número de barriles a implantar. El resumen de los resultados de los ajustes realizados se presenta en el Anexo C.1.

Se emplearon hasta tres barriles de lluvia por predio urbano, contabilizando un total de 445 barriles implantados en toda la cuenca de estudio.

Resultados

Una vez implementado el Escenario 1 en el modelo, se procederá a ejecutar la simulación y evaluar los cambios y mejoras en el funcionamiento del sistema de drenaje de la cuenca de análisis.

Para la misma lluvia de diseño del Escenario 0, en el Escenario 1, se logra disminuir la cantidad de nodos inundados, de 12 nodos inundados en el Escenario 0, se redujo a 7 el número de nodos inundados. Ahora son 26 de los 37 colectores que entran en carga en el Escenario 0. Es una respuesta alentadora como propuesta de primer escenario, aunque se puede obtener mejores resultados incrementando el número de barriles de lluvia, pero no es el caso, sino proponer medidas que garanticen su aplicabilidad en la cuenca de estudio.

En la figura 99, se muestra el comportamiento del sistema de alcantarillado, en el minuto más desfavorable luego del inicio de la tormenta.

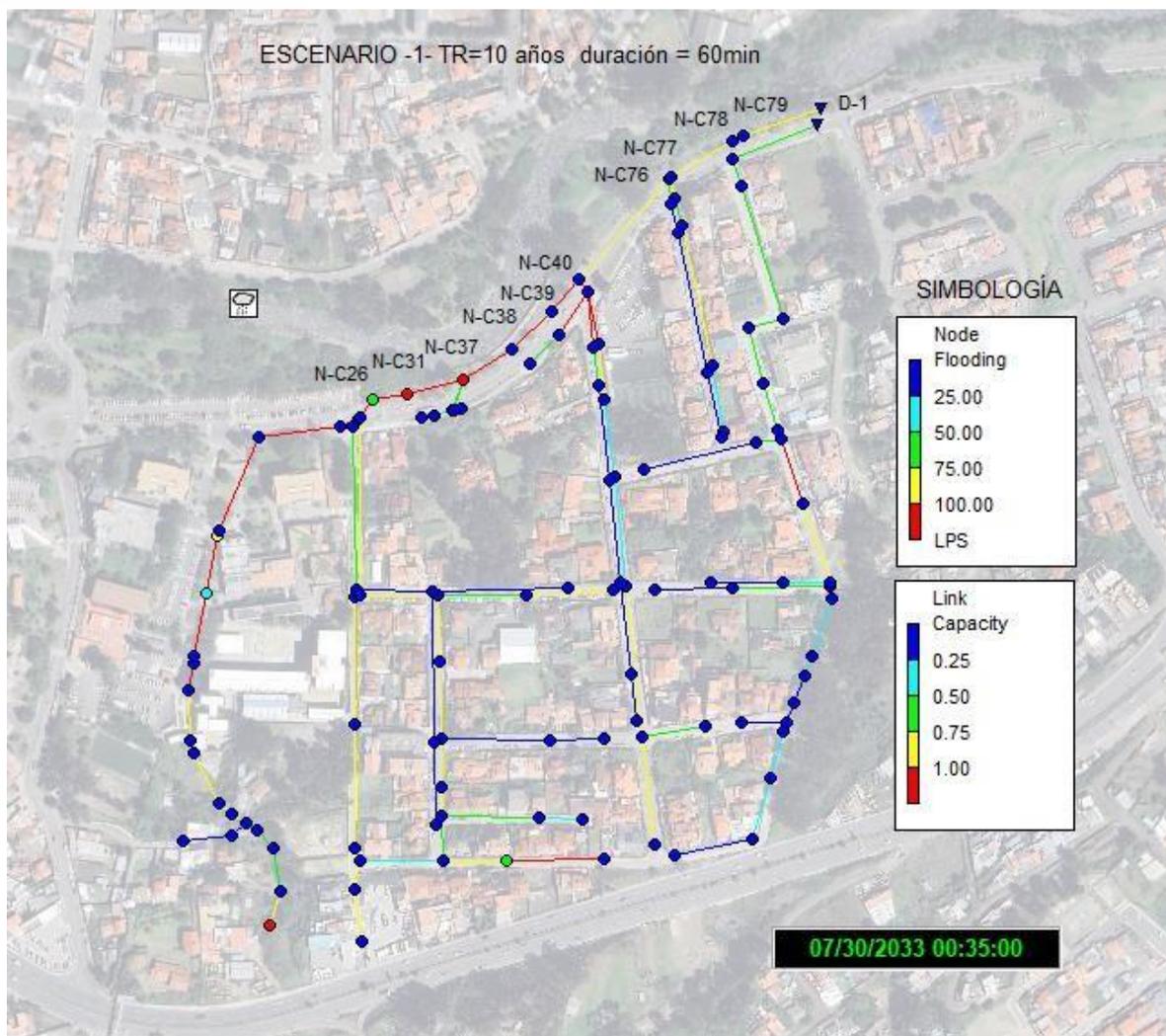


Figura 99. Representación de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en la zona de estudio – Escenario 1 (35 minutos después del inicio de la tormenta).

Los principales cambios que se observa en el sistema de alcantarillado son la liberación de carga en los colectores desde el pozo de registro N-C40 hasta el punto de descarga D-1, se ve beneficiado por la reducción de caudales desde la parte alta de la cuenca principal.

En la siguiente figura se visualiza el perfil de la lámina de agua en los colectores principales de la avenida 24 de Mayo.

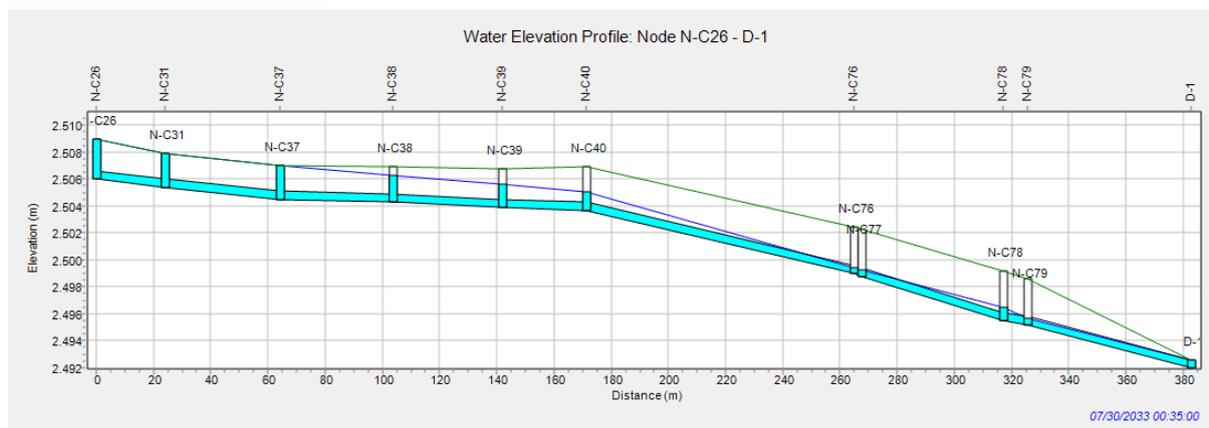


Figura 100. Vista de perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo – Escenario 1 (35 minutos después del inicio de la tormenta).

3.6.3 Escenario 2 (Celdas de bioretención)

Selección y ubicación de SUDS.

El Escenario 2, se implementa sobre el Escenario 1, es decir, el elemento incorporado en el Escenario 1 no se modifica. El segundo escenario propone implantar medidas únicamente en la parte baja de la zona de estudio, es decir, en la Av. 24 de Mayo, con la finalidad de almacenar la escorrentía generada principalmente por el parqueadero ubicado al frente de la Universidad del Azuay y la propia avenida. Es un lugar ideal para proponer celdas de bioretención como sistemas urbanos de drenaje sostenible, evidentemente es una medida estructural que requiere de una profundidad de excavación, sin embargo, para retener el volumen generado por la escorrentía de las calles y parqueaderos es una buena opción. Se propone implementar como capa de retención celdas plásticas prefabricadas de polipropileno como se muestra en la siguiente figura.

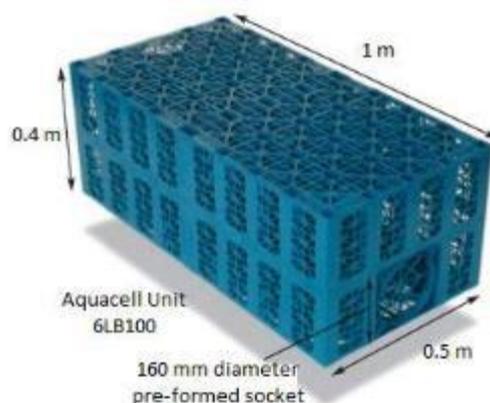


Figura 101. Unidad de celda plástica con sus dimensiones comerciales. Fuente (Lovado, 2013)

Sobre la capa de retención se ubicará una capa de material drenante como arena o grava y posteriormente cubierta por una capa vegetal o área de arbolado, esto a su vez, genera un impacto paisajístico en la urbe.

En la figura 102, se presenta el esquema del Sistema Urbano de Drenaje Sostenible a implantar en el margen del parqueadero situado a frente de la Universidad del Azuay, en las aceras de la Av. 24 de Mayo y en los parqueaderos internos de la universidad

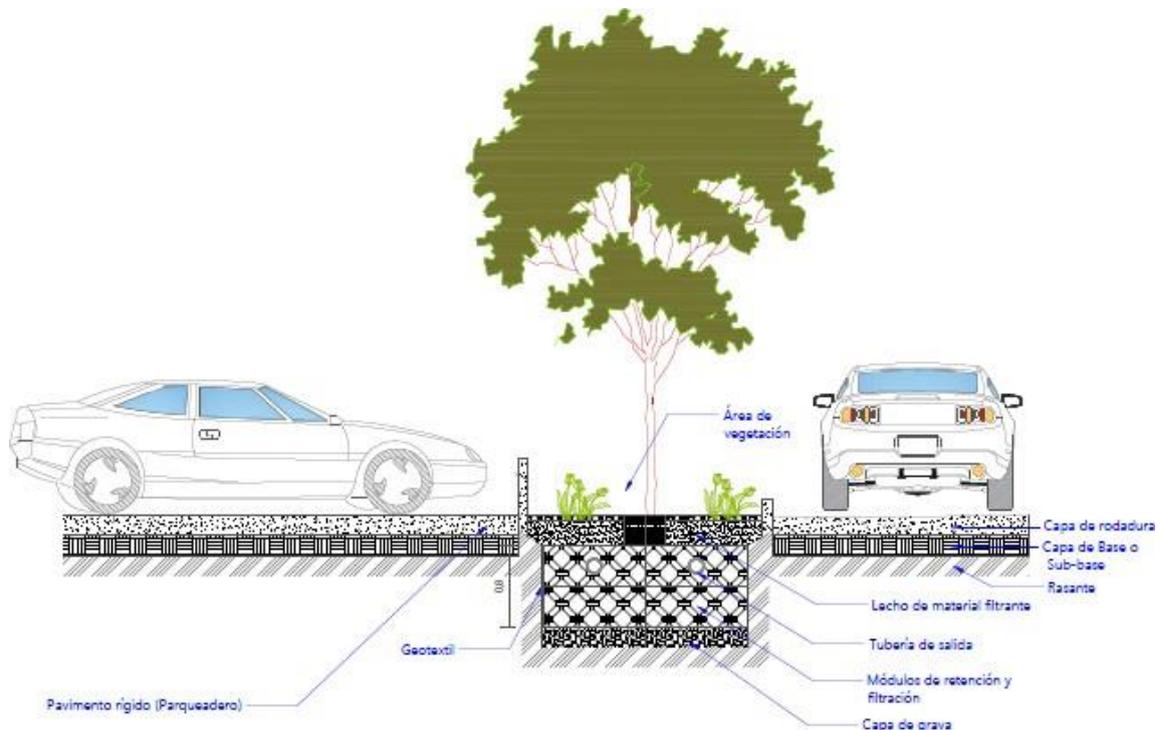


Figura 102. Celda de bio-retención a implantar como Sistema de Urbano de Drenaje Sostenible. Fuente: (Elaboración propia)

Se plantea ocupar un ancho de 2.5 m para colocar cuatro celdas plásticas en paralelo que miden 0.5 m de ancho, y los 0.5 m restantes ocupará la berma de calzada. Se profundizará 1.5 m de altura, de los cuales 0.8 m de ocuparán dos módulos de celdas plásticas, 0.3 m de material drenante para la parte superior de las celdas, 0.25 m para la capa de suelo que contendrá la cobertura vegetal y 0.15 m la capa de grava situada en la parte inferior de las celdas plásticas.

En la subcuenca S-11, se propone implantar 750 m² de celdas de bio-retención, 500 m² dentro de la universidad que conforma la subcuenca S-12 y 963 m² en las aceras de la avenida 24 de Mayo que contiene a las subcuencas S-14 y S-15.

Implementación en el modelo

Similar al proceso del Escenario 1, se procede a crear una nueva técnica de drenaje, desde la opción *LID Control Editor*. La misma que se debe configurar cuatro opciones que requiere SWMM5.2 para la simulación de celdas de bioretención. En la pestaña *Surface* se configura la superficie del elemento como: altura de la berma o borde (*Berm Height*) que separa a la calzada, rugosidad superficial (*Surface Roughness*), este parámetro de adopta un factor semejante a la rugosidad para un terreno natural. Finalmente se ajusta la pendiente de la superficie (*Surface Slope*).

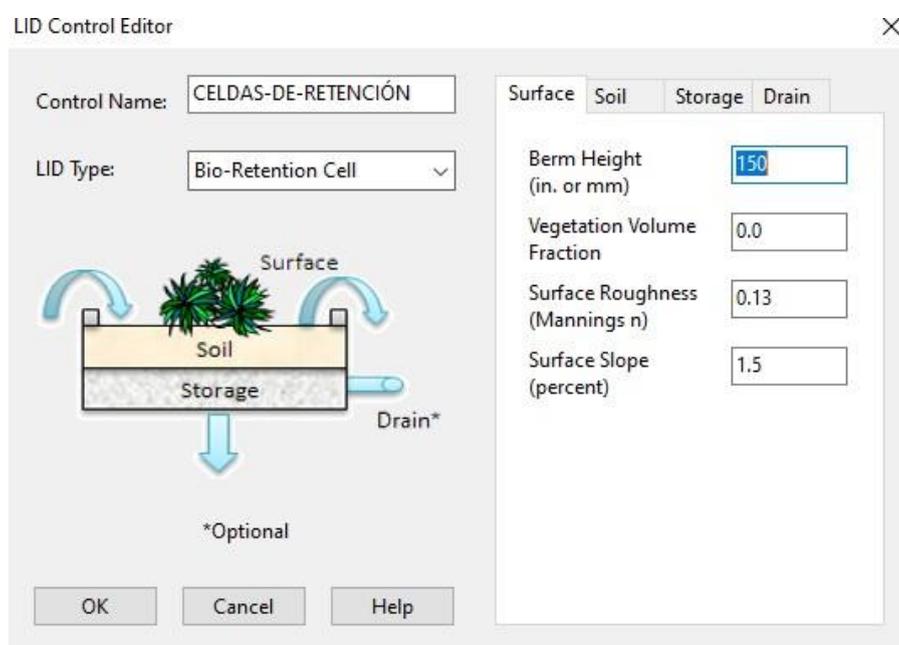


Figura 103. Configuración de la pestaña *Surface* desde la opción *LID Control Edit*.

Posteriormente, se configura la opción *Soil*, la capa de material que se encuentra sobre las celdas plásticas, como material drenante se propone un suelo de arena, las propiedades para este material se colocan de acuerdo a las recomendaciones que presenta el manual de SWMM5.2. Las propiedades empleadas se pueden consultar en la tabla a continuación.

Suelo	Porosidad	Capacidad de campo	Punto de marchitez	Conductividad hidráulica	Pendiente de conductividad	Altura de succión
	(%)	(%)	(%)	(mm/h)		(mm)
Arena	0,437	0,062	0,024	120,396	48,65	49,022
Arena margosa	0,437	0,105	0,047	29,972	49,025	60,96
Marga arenosa	0,453	0,19	0,085	10,922	39,7	109,982
Marga	0,463	0,232	0,116	3,302	43,7375	88,9
Marga limosa	0,501	0,284	0,135	6,604	23,6875	169,926
Maga areno-arcillosa	0,398	0,244	0,136	1,524	53,375	219,964
Marga arcillosa	0,464	0,31	0,187	1,016	44,2875	210,058
Marga limo-arcillosa	0,471	0,342	0,21	1,016	33,4875	270,002
Arcilla arenosa	0,43	0,321	0,221	0,508	64,65	240,03
Arcilla limosa	0,479	0,371	0,251	0,508	47,3	290,068
Arcilla	0,475	0,378	0,265	0,254	70,3	320,04

Figura 104. Propiedades de la capa suelo para diferentes tipos de suelo. Fuente (Valbuena, 2016)

En la figura a continuación, muestra los valores adoptados para la capa de suelo

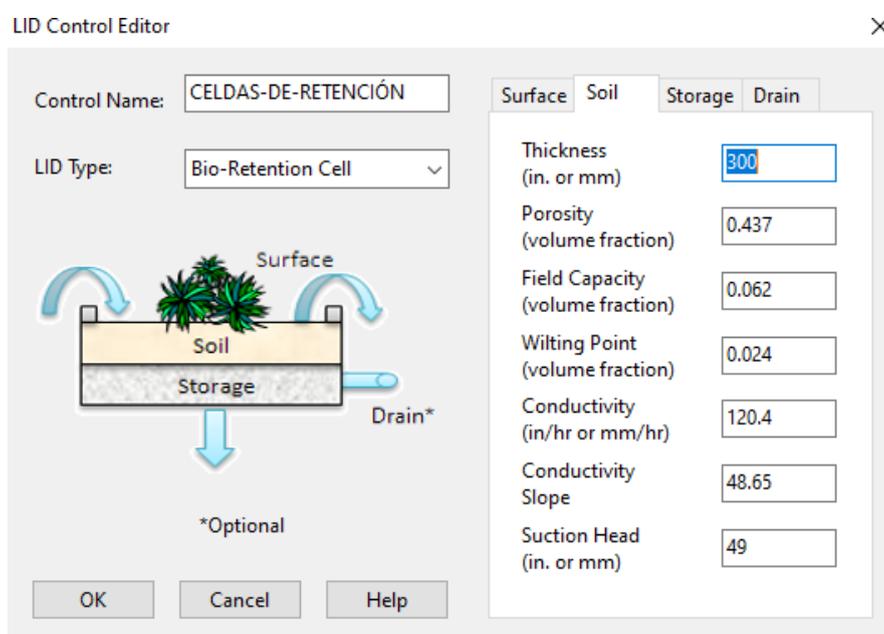


Figura 105. Configuración de la pestaña Soil desde la opción LID Control Edit

Luego se procede a configurar la opción de almacenamiento (Storage), que serían las celdas plásticas, como se propuso inicialmente ubicar dos módulos de forma vertical y cada módulo posee una altura de 400 mm, por lo tanto, el valor correspondiente para este parámetro sería 800 mm (Thickness). La relación de vacíos (Void Ratio) se asume un 90% de vacíos y 10% de sólidos. La tasa de filtración (Seepage Rate) se asume al de una grava

1 cm/s. No se considera un factor de colmatación. Los valores empleados se presentan en la siguiente figura.

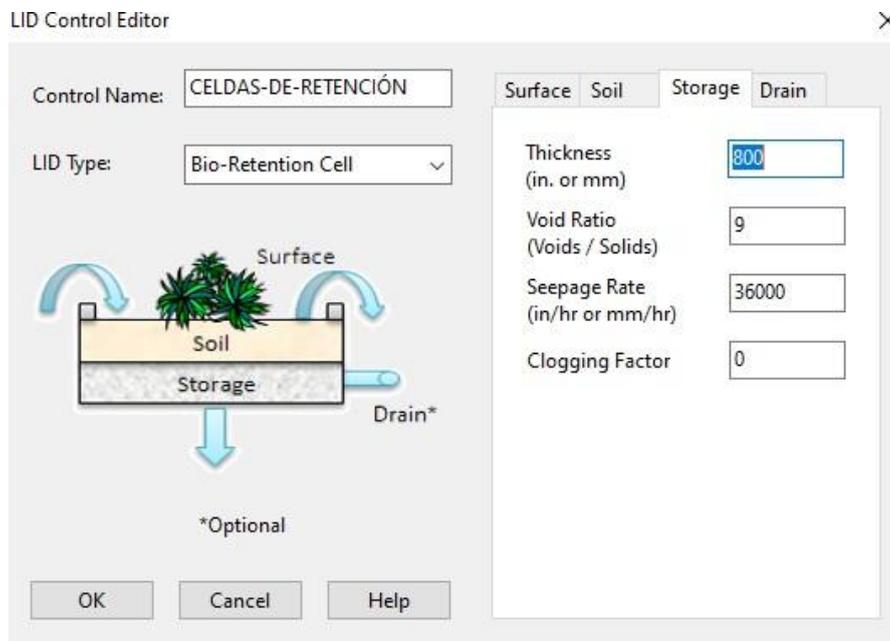


Figura 106. Configuración de la pestaña *Storage* desde la opción LID Control Edit

Finalmente, se configura las opciones de drenaje, se asume que, en caso de llenar las celdas debe drenar mediante una tubería de 160 mm ubicada desde la parte superior, hacia un pozo de registro especificado. La siguiente figura presenta los valores empleados.

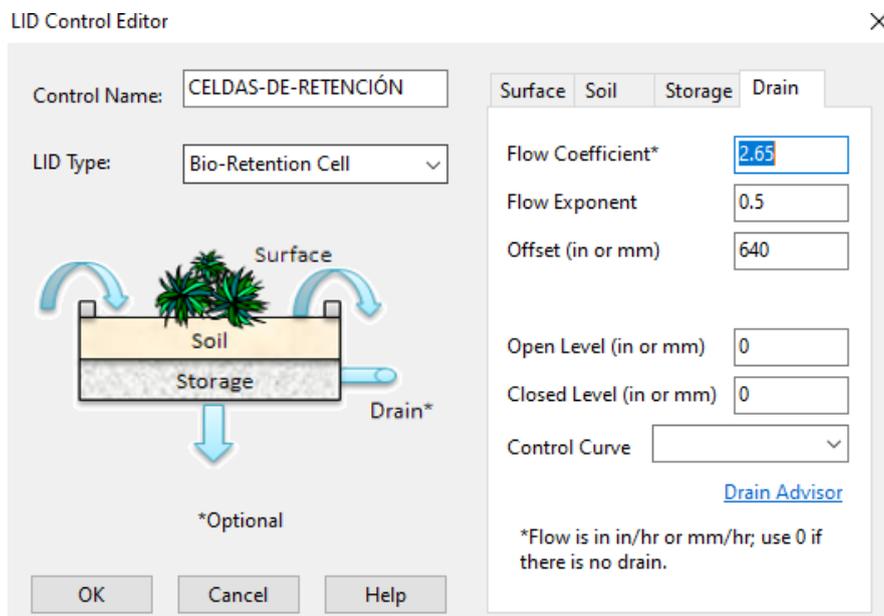


Figura 107. Configuración de la pestaña *Drain* desde la opción LID Control Edit

Desde las propiedades del objeto subcuena, se configura los parámetros como: el área que abarca, porcentaje de área a tratar, opciones de salida etc. En las figuras de a continuación se muestran los campos a ser configurados en base a la técnica a emplear.

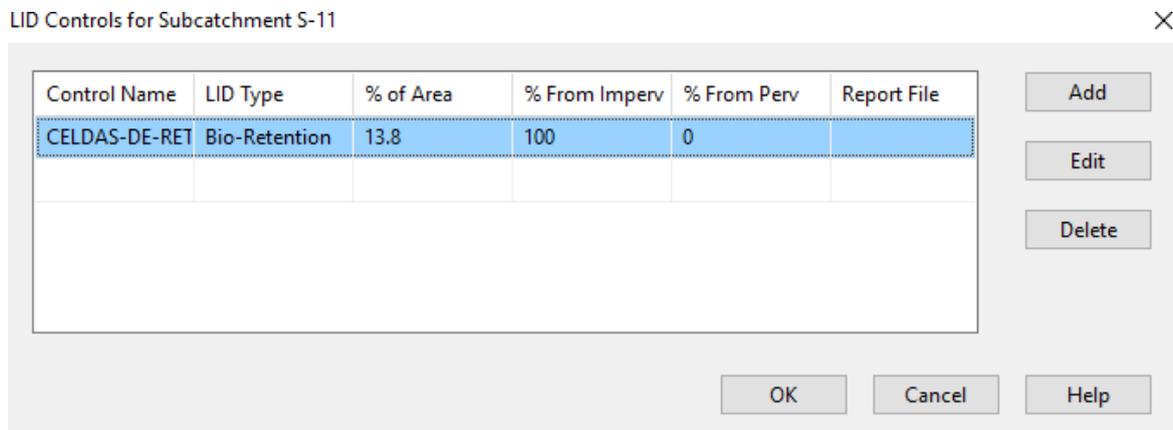


Figura 108. Adición del elemento LID (celdas de bio-retención) desde la opción LID Control Subcatchment.

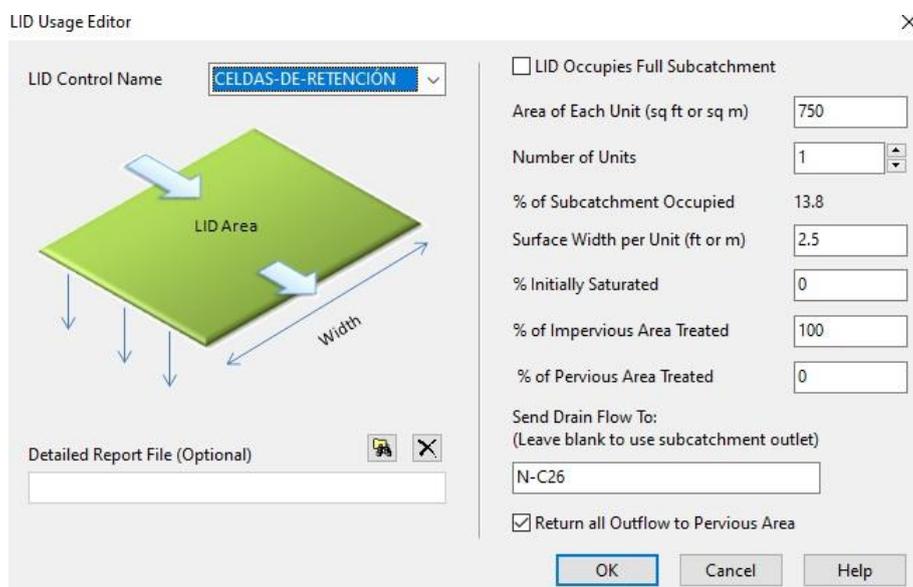


Figura 109. Configuración del elemento LID (celdas de bio-retención) desde la opción LID Usage Editor para la subcuena S-11.

Los ajustes de los parámetros para las subcuencas que contienen las celdas de bioretención se presenta en el Anexo C.2.

Resultados

Se procede a correr la simulación y verificar las mejoras respecto al Escenario 1.

Como se describió anteriormente que estas actuaciones serán implantadas únicamente en la parte baja de la cuenca de estudio y al interior de la Universidad del Azuay, sin embargo, el resultado es satisfactorio, se eliminó el número de nodo inundados en la avenida 24 de Mayo y son únicamente 4 tramos de los colectores que pierden capacidad en la avenida 24 de Mayo en el minuto 35 de la tormenta.

En la figura 109, se muestra el comportamiento del sistema de alcantarillado, en el minuto más desfavorable luego del inicio de la tormenta.

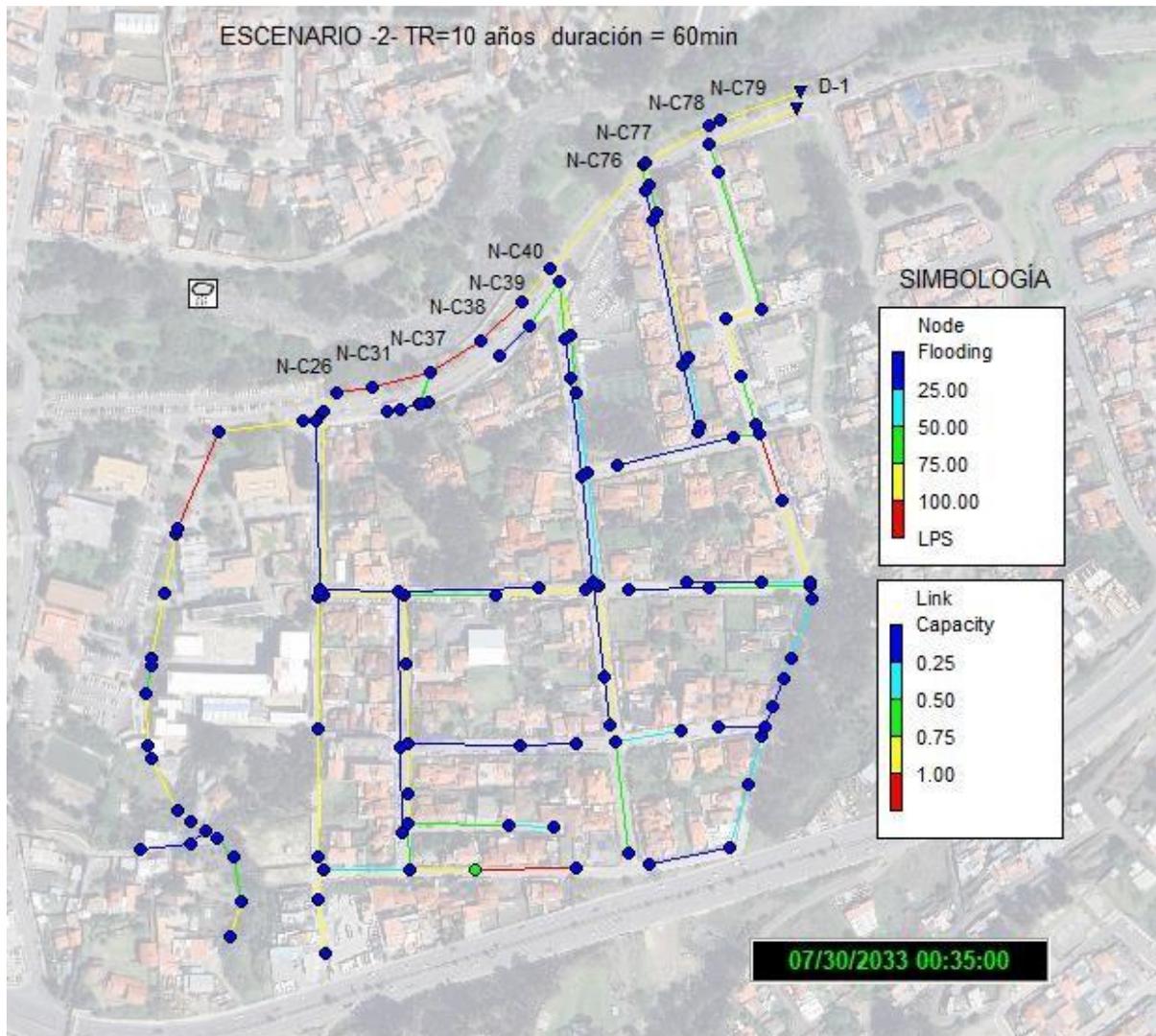


Figura 110. Representación de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en la zona de estudio – Escenario 2 (35 minutos después del inicio de la tormenta)

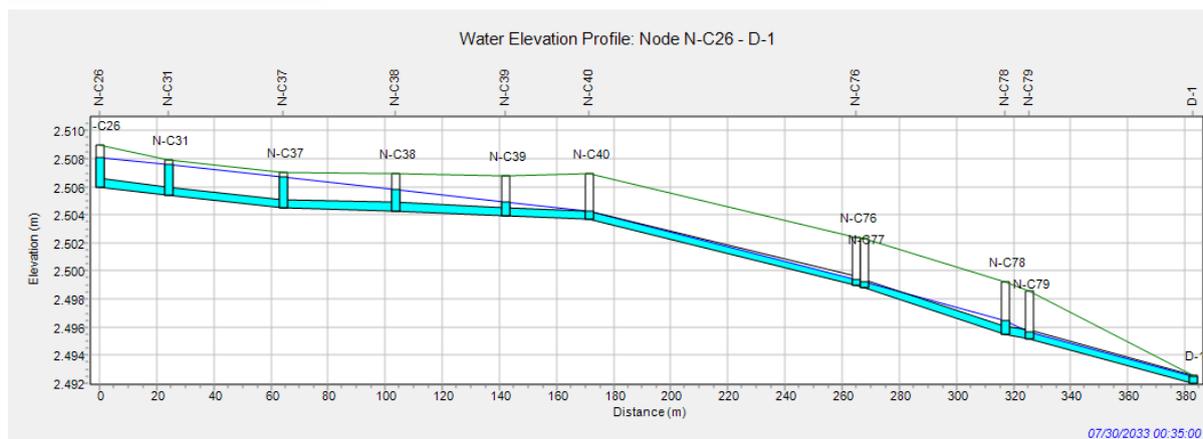


Figura 111. Vista de perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo – Escenario 2 (35 minutos después del inicio de la tormenta).

3.6.4 Escenario 3 (Pavimentos permeables)

Selección y ubicación de SUDS.

El Escenario 3, se implementa sobre el Escenario 2, a pesar del resultado bastante favorable con la implantación de celdas de bio-retención, en este escenario se incorpora una nueva tipología de drenaje urbano sostenible, aplicable en la cuenca de estudio. En este escenario se propone implantar pavimentos permeables, una técnica bastante fácil de implantar en los patios y parqueaderos. Aproximadamente, el 11% del área total de la cuenca de estudio son espacios ocupados por patios y parqueaderos, ya sea a nivel predial y de las instituciones educativas que forman parte de la zona de estudio. En estos espacios se propone incorporar pavimentos permeables, es decir, ocupar el 11% del área total de la zona de estudio. Además, se propone sobreponer pavimentos permeables en las aceras de la avenida 24 de Mayo, de tal manera que, funcione en paralelo con las celdas de bio-retención. El tipo de pavimento permeable a modelar está constituido por bloques modulares con espacios en su interior la misma que permite rellenar de material drenante, como se presenta en la figura 112.



Figura 112. Pavimento permeable de bloque modular. Fuente: (IdealBlock, n.d.)

En la siguiente figura se presenta el esquema del pavimento permeable a modelar, como capa de base se adopta un material fino como la arena y en sus espacios vacíos puede ser ocupado por grava.



Figura 113. Esquema de pavimento permeable a emplear en patios y parqueaderos.

Fuente: (Elaboración propia)

Este sistema, como medida de drenaje urbano sostenible se propone implantar en el parqueadero frente a la Universidad del Azuay, en toda su área. El esquema de ubicación se presenta a continuación.

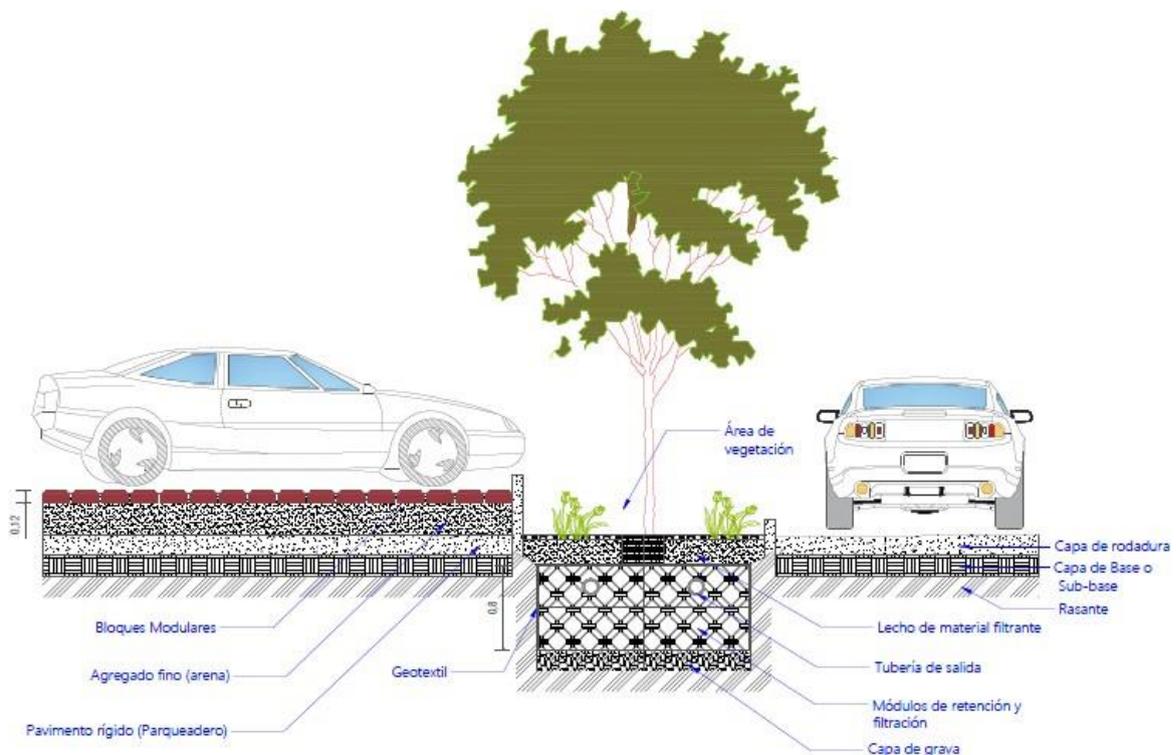


Figura 114. Esquema de ubicación de pavimento permeable en el parqueadero frente a la Universidad del Azuay y celda de bio-retención. Fuente: (Elaboración propia)

De la misma manera se propone implantar pavimentos permeables en las aceras junto a la avenida 24 de Mayo. El esquema de ubicación se presenta en la siguiente figura.

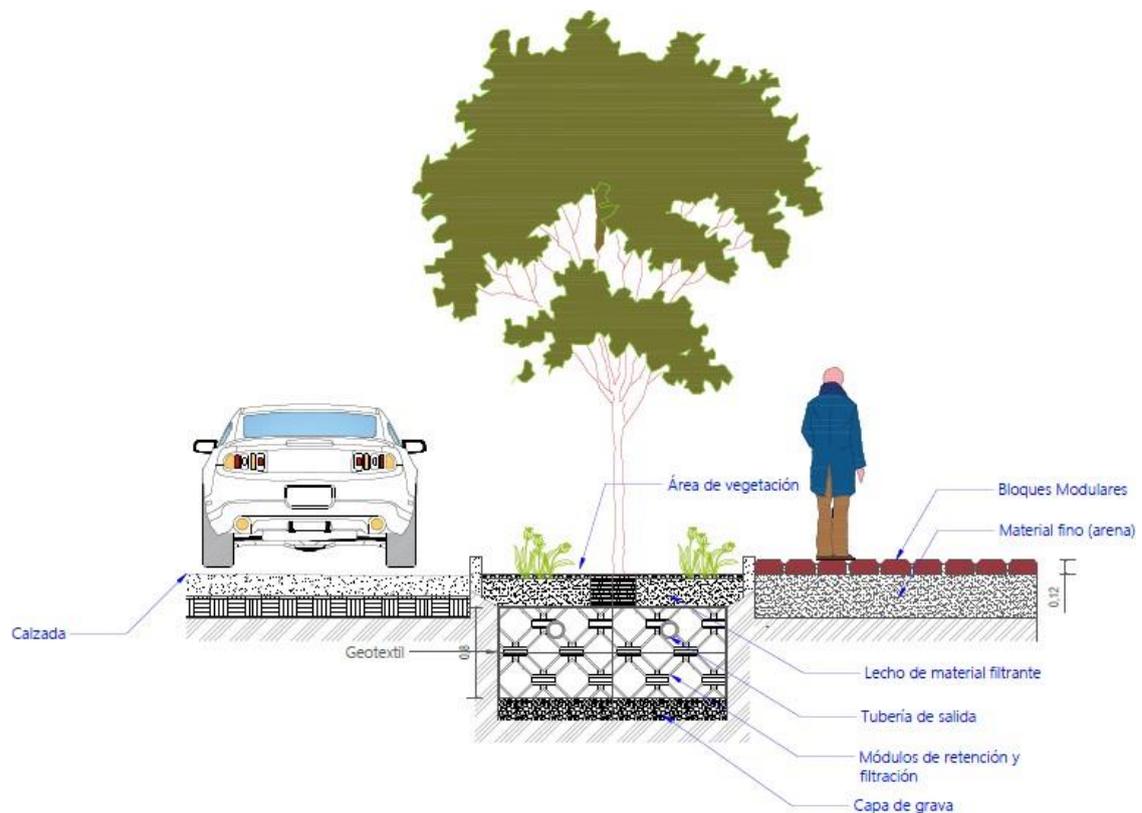


Figura 115. Esquema de ubicación de pavimento permeable y celda de bio-retención en la Av. 24 de Mayo. Fuente: (Elaboración propia)

Implementación en el modelo

Desde la opción *LID Control* se crea una nueva tipología LID, para este escenario se selecciona el LID *Permeable Pavement* y se configura los parámetros de cada capa que SWMM5.2 requiere para la simulación.

En la capa *Surface* únicamente se configura la rugosidad del pavimento y pendiente como se muestra a continuación.

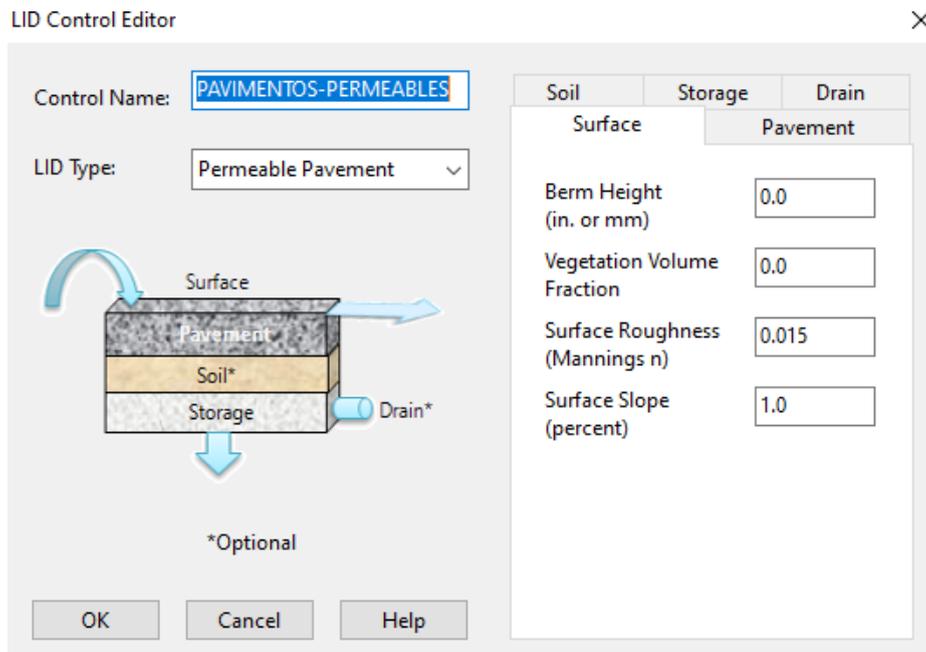


Figura 116. Configuración de la capa Surface desde LID Control Editor.

Posteriormente, se configura la capa Pavement como: la altura del bloque modular (Thickness), relación de vacíos (Void Ratio), Fracción de superficie impermeable (Impervious Surface Fraction), la permeabilidad (Permeability). El espesor se selecciona en base a los modelos comerciales y lo recomendado por el *SWMM Model User Manual*, cuyos valores están entre los 100 a 150 mm. La relación de vacíos recomendado para pavimentos modulares es de 0.78. La fracción de superficie impermeable se trata de la relación del área cubierta por material impermeable con respecto al área total del pavimento. Para pavimentos modulares este valor se adopta del 80%. Finalmente, el parámetro de la permeabilidad para pavimentos modulares, Valbuena(2016), cita en su trabajo valores entre 17000 y 25000 mm/h. Con estos valores serán completados los parámetros necesarios que solicita SWMM5.2 para la simulación del SUDS.

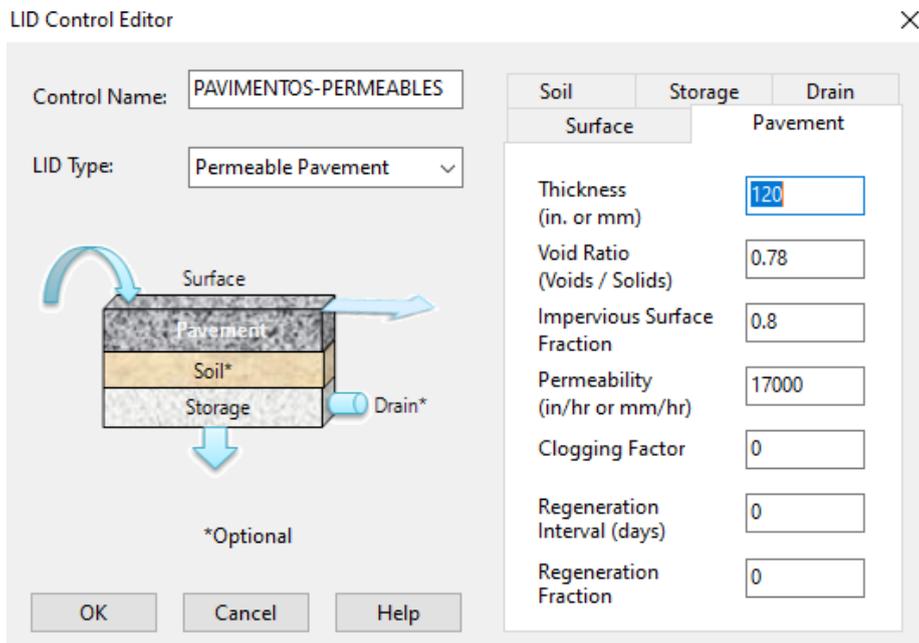


Figura 117. Configuración de la capa *Pavement* desde LID Control Editor.

La configuración de la capa de suelo se presenta en la figura a continuación, los valores adoptados son los mismos de la capa *Soil* para las celdas de bio-retención, puesto que, se empleará el mismo material.

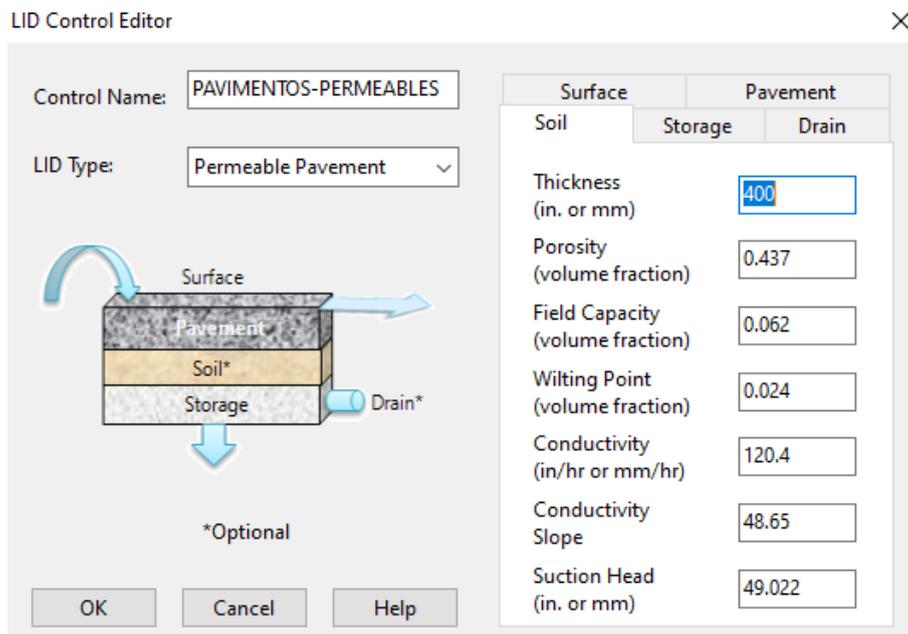


Figura 118. Configuración de la capa *Soil* desde LID Control Editor.

La capa de almacenamiento (*Storage*) se adopta un valor de 100 mm, asumiendo que se emplea una capa de grava como base del material del suelo. Finalmente, en la opción de

drenaje (*Drain*) para este caso, no se considera que drene. Las figuras siguientes muestran las configuraciones de la capa de almacenamiento y drenaje respectivamente.

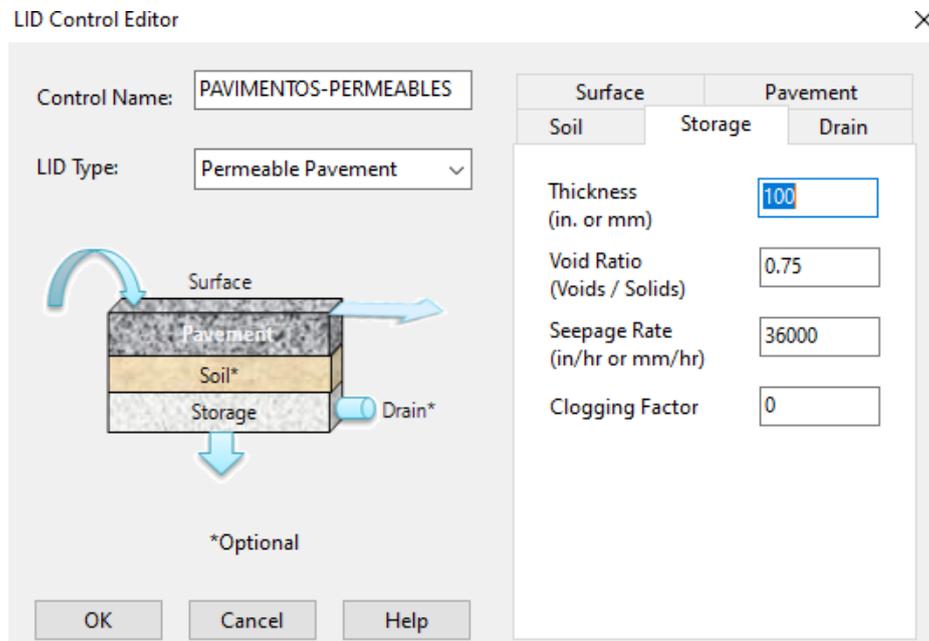


Figura 119. Configuración de la capa *Storage* desde LID Control Editor.

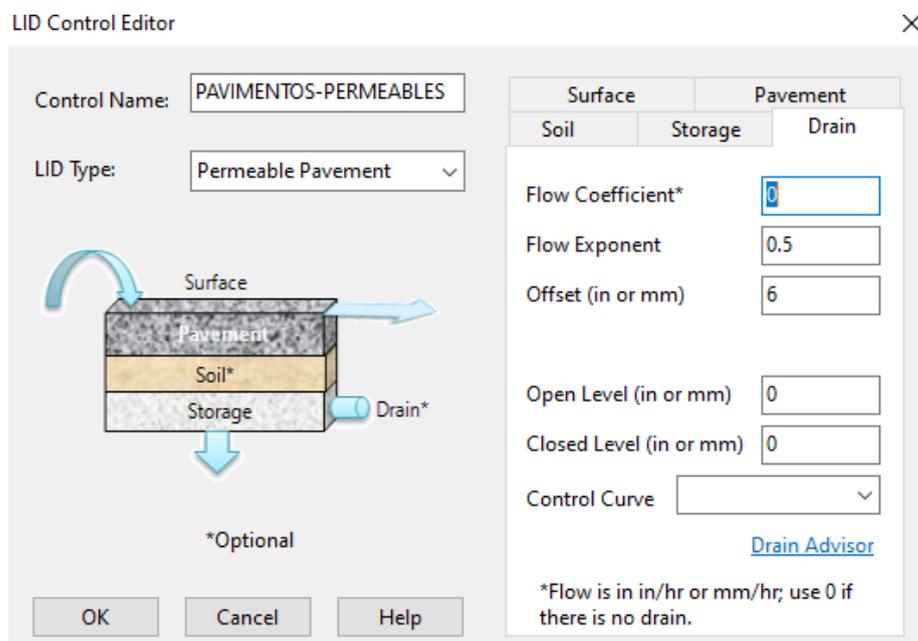


Figura 120. Configuración de la capa *Drain* desde LID Control Editor.

Posteriormente, desde las propiedades de cada subcuenca en la opción *LID Controls*, se adiciona el elemento SUDS como se presenta en la siguiente figura.

LID Controls for Subcatchment S-11

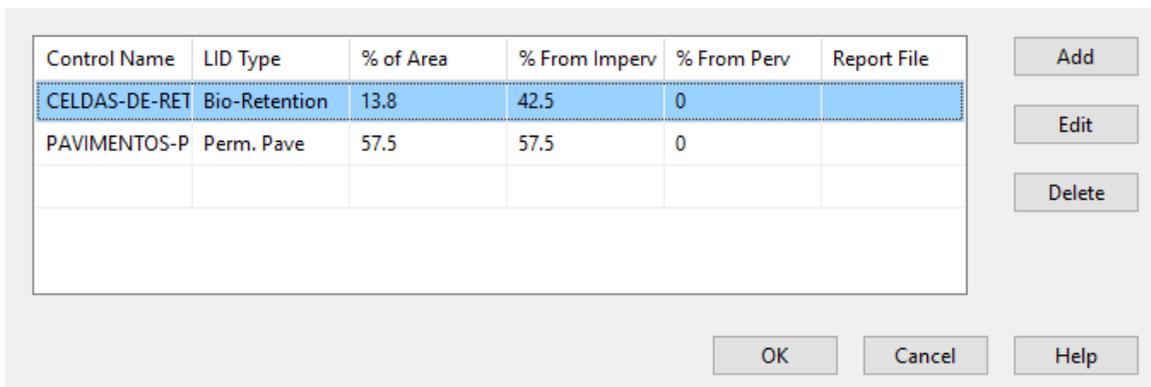


Figura 121. Adición del elemento LID (pavimentos permeables) desde la opción LID Control Subcatchment.

Finalmente, se configura los parametros de acuerdo a los requerimiento de cada subcuenca, como el área que ocupa, porcentaje del área impermeable a tratar etc. Los campos a configurar se muestran en la siguiente figura.

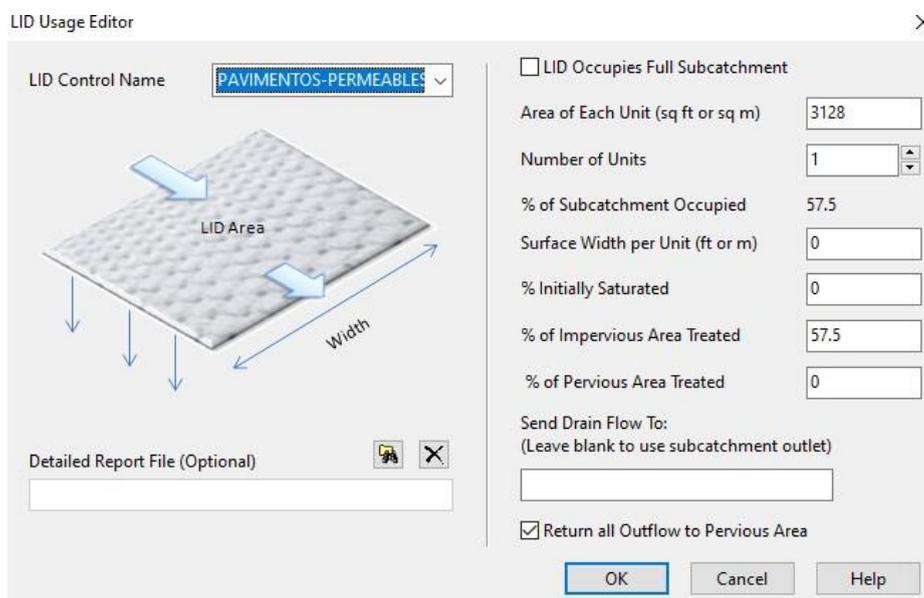


Figura 122. Configuración del elemento LID (pavimentos permeables) desde la opción LID Usage Editor para la subcuenca S-11.

Los ajustes de los parámetros para cada subcuenca aplicada pavimentos permeables se presentan en el Anexo C.3.

Resultados

Se procede a correr la simulación y evaluar las mejoras respecto al Escenario 2.

En este escenario, se logra una respuesta muy satisfactoria en el sistema de alcantarillado, se ha logrado eliminar nodos de inundación y la carga en los colectores ha disminuido totalmente. Con la implantación de tres tipologías diferentes de sistemas urbanos de drenaje sostenible, se logra obtener una red de drenaje hidráulicamente satisfactoria, para el minuto más desfavorable luego del inicio de la tormenta.

En las figuras 123 y 124, se presenta el comportamiento hidráulico de la red de alcantarillado.

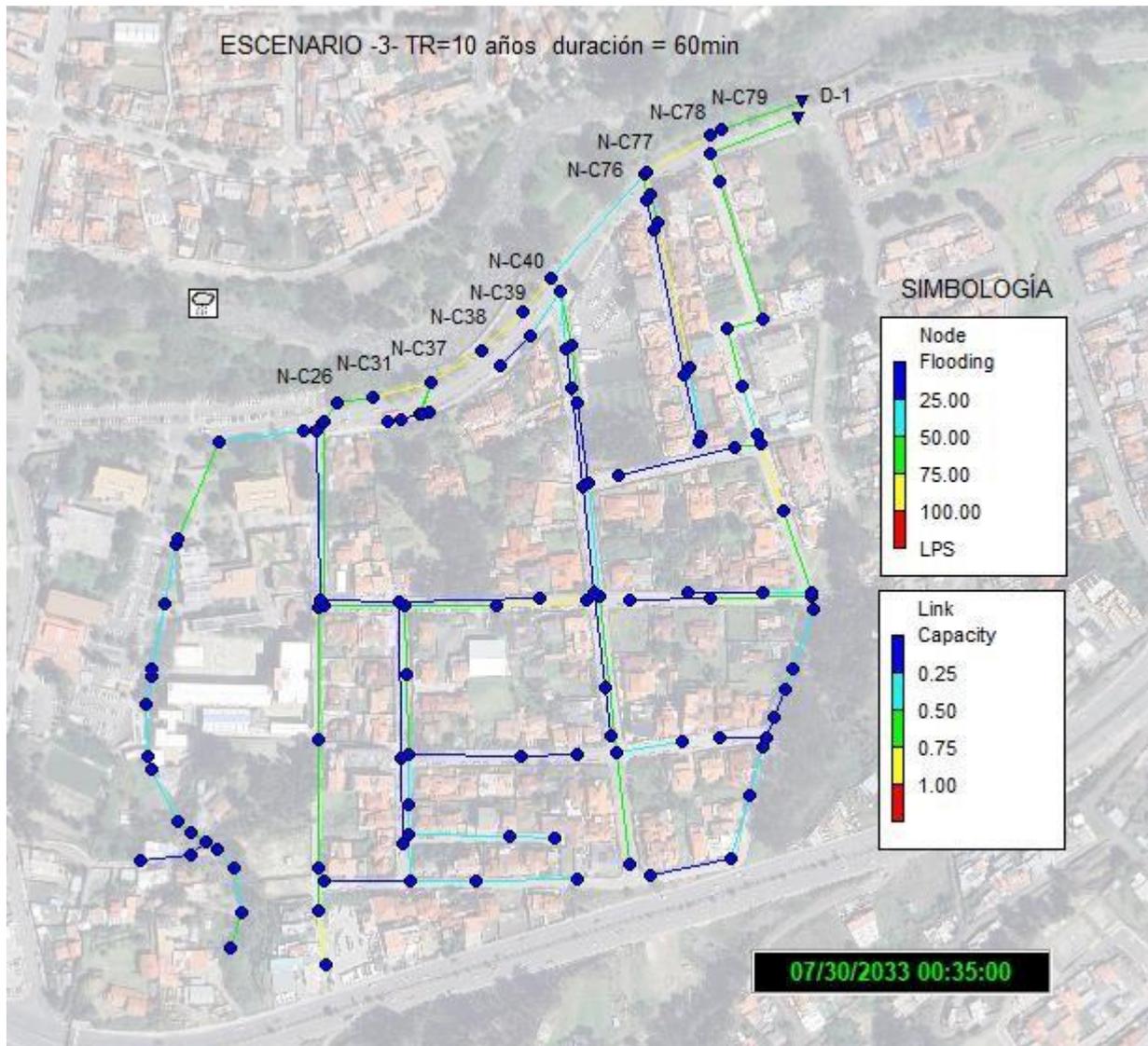


Figura 123. Representación de la carga en los colectores y la inundación en los nodos, en la zona de estudio – Escenario 3 (35 minutos después del inicio de la tormenta)

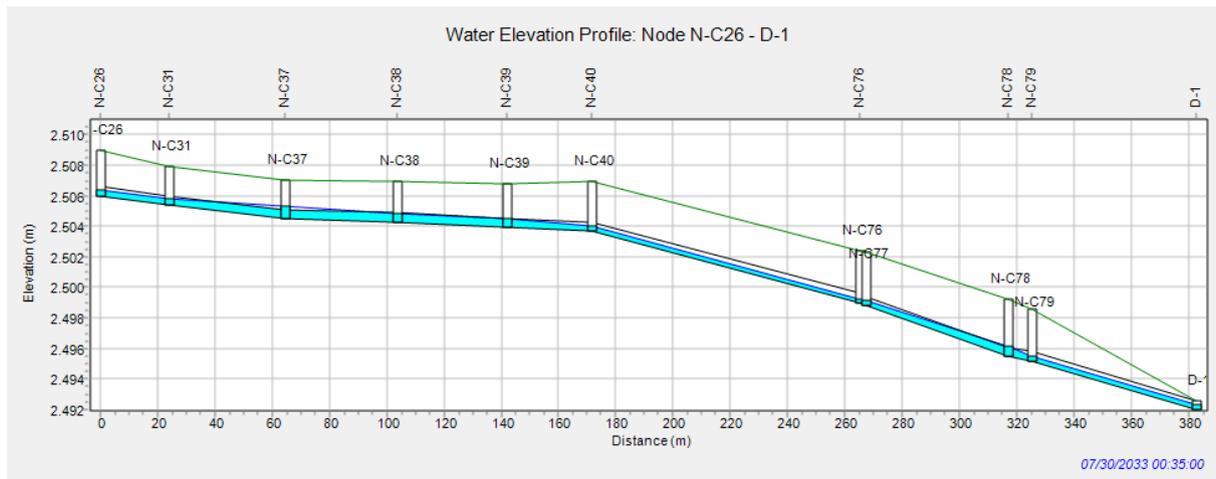


Figura 124. Vista de perfil de los colectores de la Av. 24 de Mayo – Escenario 3 (35 minutos después del inicio de la tormenta).

4. Análisis de resultados

4.1 Análisis del comportamiento hidráulico en la red de drenaje

Como se mencionó anteriormente el sistema de alcantarillado ha presentado problemas ante los eventos registrados, más aún, para una lluvia con un período de retorno de 10 años. Los problemas más notorios se encuentran en la parte baja de la zona de estudio, principalmente en la avenida 24 de Mayo, razón por el cual, el análisis se centra en el comportamiento del colector principal, es decir, en los colectores C-30, C-31, C-32, C-33, C-34, C-35, C-36, C-37, C-44 y C-38 que comprenden desde el pozo de registro N-C26 hasta el punto de descarga D-1.

4.1.1 Escenario 0

Este escenario muestra la respuesta propia de la red de drenaje ante una lluvia con período de retorno de 10 años. Es la situación base para posteriores escenarios de actuación, implantando sistemas urbanos de drenaje sostenible. En este episodio, toda la red de colectores en análisis se encuentra trabajando a flujo lleno, tres de los diez colectores superan la velocidad de 4.5 m/s, como velocidad máxima admisible para tuberías de hormigón de hasta 600 mm de diámetro, según la norma de la EMAAP-Q. En la siguiente tabla se presenta: el caudal circulante, la velocidad y capacidad en cada tubería en el momento más crítico de la tormenta. Cabe mencionar que el sistema de drenaje de la zona de estudio cuenta con dos puntos de descarga, en el análisis de las mejoras ante proponer SUDS, se enfatizará únicamente en una sola descarga que pertenece a los colectores de 600 mm, ubicados en la avenida 24 de Mayo.

Colectores	Pozos	ESCENARIO 0		
		Q [L/s]	V [m/s]	Capacidad
C-30	N-C26 – N-C31	1141.7	4.04	1
C-31	N-C31 – N-C37	794.2	2.81	1
C-32	N-C37 – N-C38	677.7	2.4	1
C-33	N-C38 - N-C39	677.76	2.4	1
C-34	N-C39 – N-C40	677.82	2.4	1
C-35	N-C40 – N-C76	1187.3	4.2	1
C-36	N-C76 – N-C77	1188	4.2	1
C-37	N-C77 – N-C78	1391.39	4.92	1
C-44	N-C78 – N-C79	1391.39	4.92	1
C-38	N-C79 – D-1	1391.39	4.92	1

Tabla 15. Caudales, velocidades y capacidades máximas obtenidas - Escenario 0.

En la figura 125, se puede evidenciar la situación inicial del colector principal. Donde, se observan pozos de registro inundados y la totalidad de colectores que se encuentran presurizados.

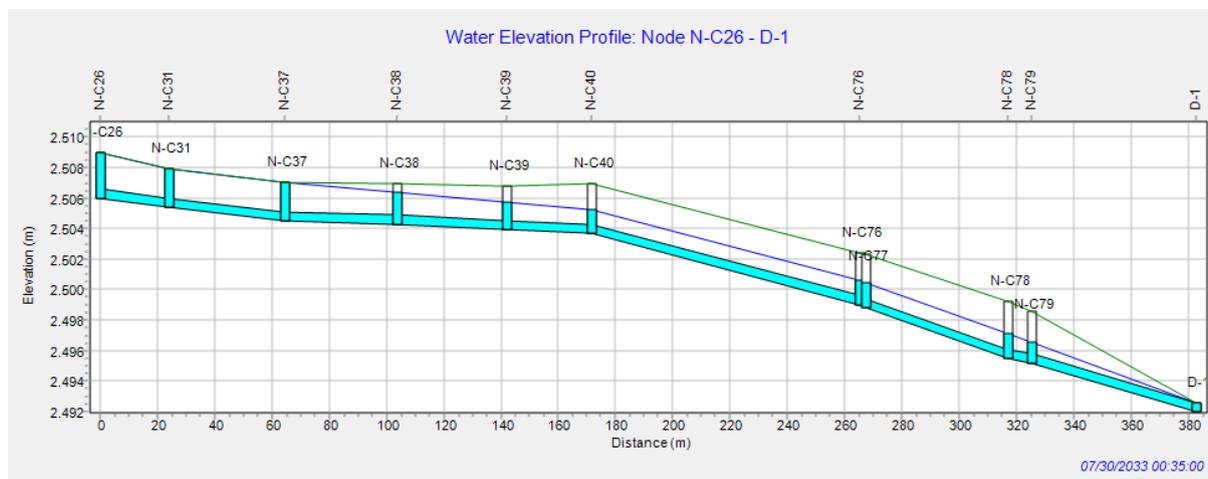


Figura 125. Perfil de elevación de la lámina de agua en el colector principal – Escenario 0.

4.1.2 ESCENARIO 1 (Barriles de lluvia)

En este escenario se presenta un primer acercamiento al uso de sistemas urbanos de drenaje sostenible. Ubicando hasta tres barriles lluvia por vivienda se obtiene resultados alentadores en la cuenca baja de la red de drenaje. Ahora, son cinco de los diez colectores que entran en carga. La respuesta favorable se debe a que, en la cuenca alta de la red de drenaje se retiene un porcentaje de volumen de agua lluvia escurrida desde las cubiertas, reduciendo caudales importantes que se conectan al colector principal. El tramo más beneficiado corresponde a partir del colector C-35, donde es evidente la disminución del caudal circulante. Sin embargo, las velocidades superan el valor máximo admisible recomendado por la EMAAP-Q, en un segundo escenario se enfatizarán estos valores. Los valores obtenidos en el Escenario 1 se presentan en la siguiente tabla.

Colectores	Pozos	ESCENARIO 1		
		Q [L/s]	V [m/s]	Capacidad
C-30	N-C26 – N-C31	1141.7	4.04	1
C-31	N-C31 – N-C37	794.2	2.81	1
C-32	N-C37 – N-C38	718.89	2.54	1
C-33	N-C38 - N-C39	718.82	2.54	1
C-34	N-C39 – N-C40	718.82	2.54	1
C-35	N-C40 – N-C76	1159.11	4.63	0.88
C-36	N-C76 – N-C77	1153.86	5.37	0.76

C-37	N-C77 – N-C78	1285.67	4.86	0.93
C-44	N-C78 – N-C79	1285.6	4.74	0.96
C-38	N-C79 – D-1	1272.63	4.69	0.96

Tabla 16. Caudales, velocidades y capacidades máximas obtenidas - Escenario 1.

En la figura 126, se puede evidenciar la situación del colector principal, ante una primera actuación con Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. Donde, se observa un cambio en el comportamiento hidráulico a partir del pozo de registro N-C40.

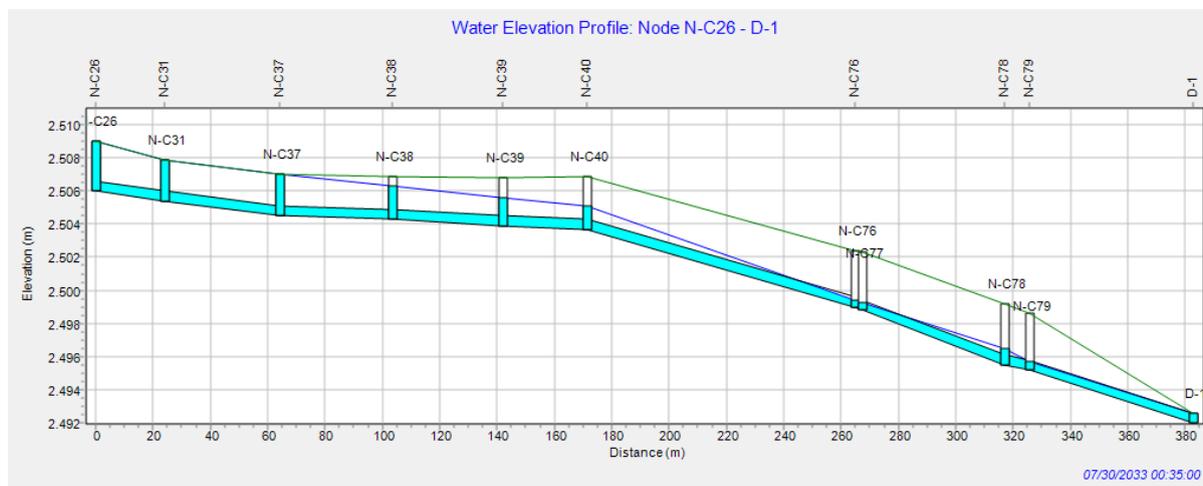


Figura 126. Perfil de elevación de la lámina de agua en el colector principal – Escenario 1.

4.1.3 Escenario 2 (Celdas de bioretención)

En este escenario se propuso como medida estructural de rehabilitación en la red de drenaje, la creación de celdas de bio-retención. Este sistema urbano de drenaje sostenible implantado, trataría la escorrentía únicamente de las calles y parqueaderos mencionados en la sección 3.6.3, presenta una mejora en cuanto a caudales conducidos, sus valores se ven reducidos respecto al escenario anterior. Ahora, son cuatro de los diez colectores que están en carga. En el colector C-30, se observa una gran reducción de velocidad y caudal conducido, se debe, a la retención del volumen generado por la escorrentía del parqueadero y zonas en el interior de la universidad. Es posible no evidenciar gran cambio en el comportamiento de la red principal, debido a que, no se ha implementado en este escenario sistemas urbanos de drenaje sostenible en la cuenca alta de la red. Los valores obtenidos se presentación a continuación.

		ESCENARIO 2		
Colectores	Pozos	Q [L/s]	V [m/s]	Capacidad
C-30	N-C26 – N-C31	795.42	2.81	1
C-31	N-C31 – N-C37	794.98	2.81	1

C-32	N-C37 – N-C38	800.38	2.83	1
C-33	N-C38 - N-C39	800.52	2.83	1
C-34	N-C39 – N-C40	800.56	2.9	0.98
C-35	N-C40 – N-C76	1107.74	4.82	0.81
C-36	N-C76 – N-C77	1098.28	5.3	0.73
C-37	N-C77 – N-C78	1236	4.73	0.92
C-44	N-C78 – N-C79	1236.04	4.63	0.94
C-38	N-C79 – D-1	1215.18	5.07	0.85

Tabla 17. Caudales, velocidades y capacidades máximas obtenidas - Escenario 2.

El resultado más evidente en este escenario es la desaparición del agua en la superficie de las calles, pese a estar el sistema presurizado en los colectores C-30, C-31, C-32, C-33 y C-34, la inundación de los pozos de registros se ven limitados desbordar a la calle. En la siguiente figura se presenta el perfil de la lámina de agua del colector principal.

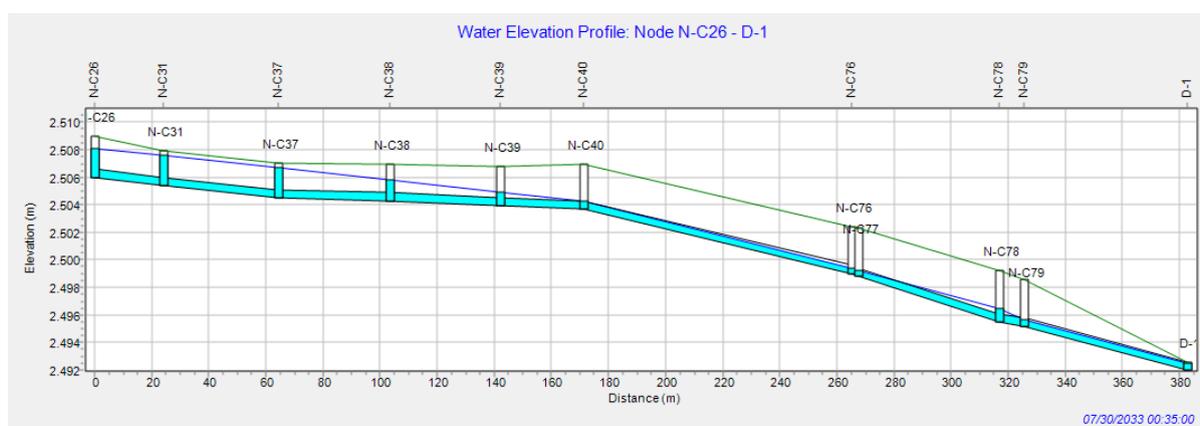


Figura 127. Perfil de elevación de la lámina de agua en el colector principal – Escenario 2.

4.1.4 ESCENARIO 3 (Pavimentos permeables)

Como tercera actuación con medidas de rehabilitación ante el comportamiento hidráulico deficiente de la red, se propuso aprovechar patios, parqueaderos y aceras con pavimentos permeables. Obteniendo resultados satisfactorios en el colector principal, donde, se ha reducido caudales, velocidades e incluso las tuberías se liberan de estar completamente en carga. Ahora, únicamente tres tuberías no cumplen la capacidad de flujo, es decir, la relación calado-diámetro (y/D) sobrepasa el 85% que según la EMAAP-Q lo establece, aunque, lo recomendable sería no sobrepasar el 75% de sección a flujo lleno, sin embargo, la duración del evento no es muy prolongado, y contar con dichos valores por un lapso de tiempo es válido. Por otra parte, casi la totalidad de tuberías cumplen con velocidades máximas permisibles según la norma de la EMAAP-Q, para tuberías de hormigón simple

con secciones de hasta 600 mm. En la siguiente tabla se presentan los parámetros hidráulicos obtenidos para el Escenario 3.

		ESCENARIO 3		
Colectores	Pozos	Q [L/s]	V [m/s]	Capacidad
C-30	N-C26 – N-C31	623.32	3.23	0.68
C-31	N-C31 – N-C37	597.54	2.4	0.88
C-32	N-C37 – N-C38	598.01	2.21	0.96
C-33	N-C38 - N-C39	544.7	2.03	0.95
C-34	N-C39 – N-C40	485.75	2.09	0.82
C-35	N-C40 – N-C76	614.91	4.44	0.49
C-36	N-C76 – N-C77	588.59	4.48	0.46
C-37	N-C77 – N-C78	711.48	3.11	0.81
C-44	N-C78 – N-C79	679.11	2.95	0.81
C-38	N-C79 – D-1	665.01	4.51	0.52

Tabla 18. Caudales, velocidades y capacidades máximas obtenidas - Escenario 3.

En la siguiente figura se presenta el perfil de la lámina de agua del colector principal, donde, se evidencia el funcionamiento del sistema en el minuto más crítico.

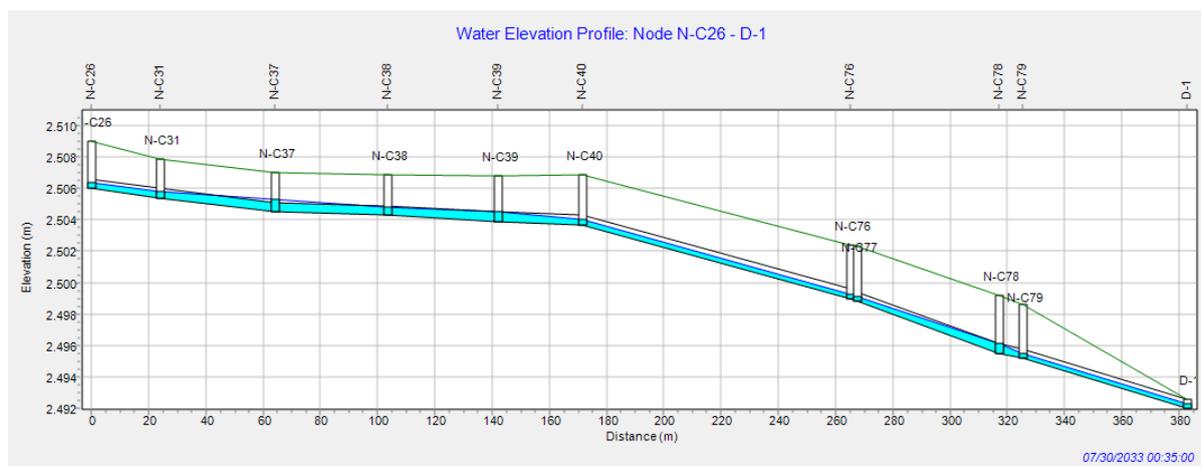


Figura 128. Perfil de elevación de la lámina de agua en el colector principal – Escenario 3.

4.2 Hidrograma de escorrentía superficial de escenario evaluados

Se ha evidenciado claramente que el sistema de drenaje posee problemas de evacuación ante una lluvia con un período de retorno de 10 años, como se mostró en el Escenario 0. La misma que produce una escorrentía superficial pico de 5219.45 litros por segundo, sin considerar pérdidas en el sistema, provocando problemas de operatividad hidráulica en el 32.7% de las tuberías de la zona de estudio, las mismas que se encuentran presurizadas. El 26.5% de las tuberías no cumplen los criterios de velocidad máxima admisible en algún

instante de la lluvia. Sin embargo, implementando sistemas urbanos de drenaje sostenible se logra disminuir estos problemas, llegando a reducir la escorrentía superficial pico a 2026.57 litros por segundo en el Escenario 3, es decir, se llega a reducir un 61% del flujo superficial del Escenario 0. Estos resultados permiten mejorar los criterios de operatividad hidráulica del sistema de drenaje, cumpliendo con gran parte de las recomendaciones establecidas en la norma de la EMAAP-Q, adoptada como referencia para el análisis de la red de alcantarillado.

La reducción del caudal pico de escorrentía superficial, que se ha logrado al emplear Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible para cada escenario, se verifica en la siguiente figura.

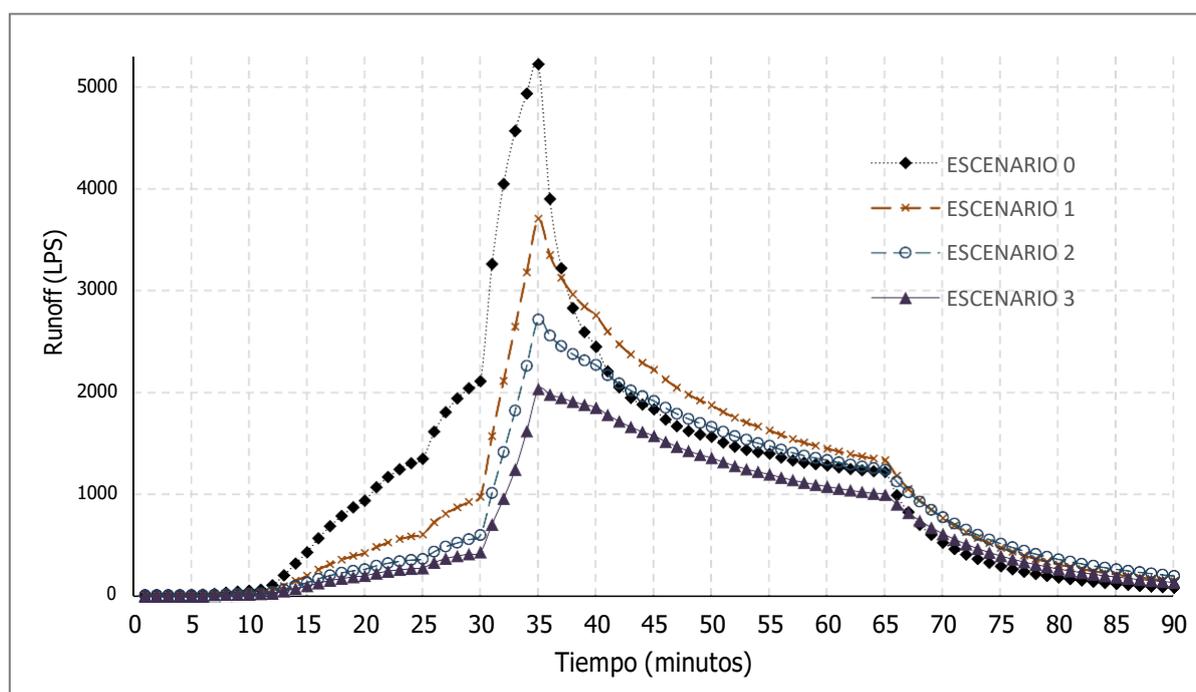


Figura 129. Comparativa de hidrogramas pico de escorrentía superficial en la zona de estudio de los escenarios evaluados.

	ESCORRENTIA PICO (LPS)	% DE REDDUCCIÓN
ESCENARIO 0	5219.45	
ESCENARIO 1	3700.67	29%
ESCENARIO 2	2710.74	48%
ESCENARIO 3	2026.57	61%

Tabla 19. Caudales pico de escorrentía superficial para cada escenario y porcentajes de reducción respecto al Escenario 0.

5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La zona de estudio contiene aproximadamente un 65% de área impermeable, es probable que en los próximos años este valor incremente, debido a la demanda poblacional, donde, se estima un incremento del 34% de población urbana para el año 2033, según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT), de la ciudad de Cuenca. Espacios verdes, pueden verse sustituidos por superficies impermeables, limitando procesos hidrológicos como la infiltración y evapotranspiración. Ante este proceso urbanizador que afecta en gran escala a las redes de drenaje, enfrentarlas con Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), es una de las alternativas para mitigar problemas de evacuación de las aguas pluviales.

Aprovechando de los sistemas de almacenamiento, retención e infiltración como medidas sostenibles para la evacuación del agua generada por la lluvia, se evidenció una contribución satisfactoria en la reducción del caudal pico de escorrentía generado, estos sistemas urbanos de drenaje sostenible han demostrado almacenar y retener la escorrentía que ingresa al sistema de alcantarillado, aliviando las redes de drenaje especialmente en los colectores de la avenida 24 de Mayo, donde confluyen todos los caudales, que llegan a exceder la capacidad óptima y el funcionamiento permisible de las tuberías.

Con la implementación de tres barriles de lluvia en cada vivienda (Escenario 1), se logra disminuir un 29% del caudal de escorrentía superficial que tiene que ser evacuado por la red de drenaje. Es una alternativa factible de implantar a nivel residencial, estos elementos de almacenamiento se pueden adquirir en el mercado local y no requiere de un alto costo en mantenimiento. El agua de lluvia almacenada puede ser reutilizada posteriormente para limpieza y riego o simplemente descargar a la red pública cuando el evento de lluvia haya disminuido.

Con la implementación de barriles de lluvia en las viviendas y celdas de bioretención (Escenario 2) en los márgenes de la avenida 24 de Mayo, en el parqueadero que se encuentra ubicado frente a la universidad y en el interior de la Universidad del Azuay, se ha logrado reducir el caudal de escorrentía superficial hasta un 48% respecto al Escenario 0. El comportamiento de la red principal mejoró en cuanto a capacidades de transporte, disminuyendo a cuatro colectores que siguen en carga, en el minuto más desfavorable de la tormenta. A partir de este resultado y de acuerdo a la factibilidad de implantar sistemas urbanos de drenaje sostenible en la zona de estudio, se propone aprovechar de los sistemas de infiltración mediante pavimentos permeables, sobreponiendo bloques

modulares en aceras, patios y parqueaderos a nivel residencial y espacios públicos. De esta manera, los tres sistemas urbanos de drenaje sostenible trabajando en paralelo, lograron reducir el pico de escorrentía superficial hasta un 61%, mejorando en su totalidad la sobrecarga en los colectores, y cumpliendo en su mayoría valores permisibles de la normativa referencial.

Por otra parte, bajo estas circunstancias la red de drenaje será capaz de evacuar una lluvia con un periodo de retorno de 10 años y 60 minutos de duración, la misma que alcanza una intensidad máxima de 139 mm/h, ante una intensidad extrema registrada a nivel local para 60 minutos de duración que no supera los 100 mm/h, es decir, se encuentra del lado de la seguridad, en caso de presentar lluvias con periodos de retorno superiores, debido al cambio climático que se vive en la actualidad.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos estiman la realidad de los sucesos presentados en este trabajo, el comportamiento actual de la red fue validado con dos eventos registrados, que han sido causantes de problemas a nivel local, sin embargo, la calibración del modelo queda fuera del alcance de este trabajo, dado que, no existe un punto de control o monitoreo de descargas en la salida de la red de drenaje.

Recomendaciones

El manejo del agua pluvial, en muchos casos queda desapercibido y es, en ocasiones de desastres por los problemas de evacuación del agua lluvia, que se convierte en tema a discutir. Por ello, establecer ordenanzas en el uso del suelo, que minimice la impermeabilidad y se fomente a la aplicación de sistemas urbanos de drenaje sostenible en áreas residenciales, comerciales e institucionales, ayudará a evitar colapsos en los sistemas de alcantarillado existentes. Además, sería un gran avance a nivel local en tema de manejo y gestión del agua pluvial.

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible propuestos conjuntamente con otras tipologías mencionadas en este trabajo, se pueden replicar en diferentes puntos de la urbe, que han sido foco de inundaciones producto de la incapacidad de la red de drenaje ante eventos de gran magnitud, tal es el caso, en el sector de El Arenal, se puede optar por implantar sistemas en superficie para contrarrestar el nivel de impermeabilidad del parqueadero y disminuir volúmenes de escorrentía generada, que inunda la avenida principal constantemente ante eventos de gran intensidad, tema que puede ser tratado para futuros proyectos en hidrología urbana.

6. Referencias

- Abellán, A. (2016a). *Depósito de retención*. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>
- Abellán, A. (2016b). *Pozo de infiltración empleando geoceldas*. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/pozos-y-zanjas-de-infiltracion/>
- Abellán, A. (2016c). *Zanja de infiltración*. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/pozos-y-zanjas-de-infiltracion/>
- Agencia Iberoamericana para la difusión de la ciencia y la tecnología, (DIYT). (2016). *Sistemas de bioretención*. <https://www.dicyt.com/noticias/mitigan-inundaciones-en-epoca-de-lluvia-con-un-novedoso-sistema-de-biorremediacion>
- Arocha, S. (1983). *Cloacas y Drenajes* (V. S.r.l (ed.); Primera).
- AsfaltosUnico. (2018). *Asfalto permeable*. <https://unicoasfaltos.es/asfalto-permeable/>
- Butler, D., & Davies, J. W. (2018). Urban Drainage. In *Urban Drainage, Fourth Edition* (Second). <https://doi.org/10.1201/9781351174305>
- CEPIS. (2005). Guías Para el Diseño de Tecnologías de Alcantarillado. In *Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente - Cepis*. <http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/sanea/169esp-diseno-alcantar.pdf>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., Mays, L. W., & Ven Te Chow, David R. Maidment, L. W. M. (1988). *Applied Hydrology*. http://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- Cordero, P., Vanegas, S., & Hermida, M.-A. (2015). La biodiversidad urbana como síntoma de una ciudad sostenible. Estudio de la zona del Yanuncay en Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 6(1), 107–130. <https://doi.org/10.18537/mskn.06.01.09>
- Dolz, J., & Manuel, G. (1994). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores. *Ingeniería Del Agua*, 1(1), 55–66. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2631>
- Duque, N. (2013). Metodología para la optimización del diseño de tuberías en serie en sistemas de alcantarillado. In *Universidad de los Andes*.
- EATHISA. (2018). *Tubería de Hierro Ductil*. Tubería de Hierro Fundido Dúctil. <http://eathisa.com/productos/tuberia-de-hierro-fundido-ductil/>
- EMAAP-Q. (2009). *Normas de diseño de sistemas de alcantarillado para la EMAAP-Q* (M. Punguil (ed.); Primera Ed, Issue 1). V&M Gráficas.
- EXPOCIHAC. (2023). *Pavimentos Permeables*. <https://www.expocihachub.com/nota/ingenieria-y-construccion/innovacion-sustentable-concreto-permeable>
- Fair Gordon Maskew, Geyer John Charles, & Okun Daniel A. (2004). *Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales* (Vols. 1–2, pp. 1–278).
- Gómez, M. (2007). Hidrología urbana. In *Colección CBI*.
- Gómez, M. (2007). Curso de análisis y rehabilitación de redes de alcantarillado mediante el código SWMM 5.0. In *Universidad Politécnica de Catalunya*. FLUMEN.

- IdealBlock. (n.d.). *TURFS TO NEGRIDPAVERS*.
<https://www.idealconcreteblock.com/products/pavers/permeable-pavers/turfstone/>
- INAMHI. (2019). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*, 2, 282.
http://www.serviciometeorologico.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO_DE_INTENSIDADES_V_FINAL.pdf
- López Cualla, R. A. (1995). Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 1).
- Lovado, S. (2013). *Retención De Aguas Lluvias a Nivel Predial Para Reducir Picos Y Volúmenes De Escorrentía* [Universidad de los Andes].
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/20109/u672054.pdf?sequence=1>
- Made-in-china. (2023). *Barril de HDPE*. https://es.made-in-china.com/co_be0a099d958a6897/product_200L-Plastic-Water-Iron-Coops-Barrel-New-HDPE-Container-with-Competitive-Price_uooyngnhsy.html
- Maturana, C. (2007). Agua Y Ciudad Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible. *Arquitecturas Del Sur*, 24(33), 52–57.
- Metcalf y Eddy. (1995). Ingeniería de aguas residuales. In A. G. Brage (Ed.), *McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA* (Primera). Impresos y revistas S.A.
- Moreira Romero I, Á. F. (2022). *Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible Sustainable Urban Drainage Systems Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana*. 7(7), 2051–2060.
<https://doi.org/10.23857/pc.v7i7>
- Navarro, D. (2018). *Cunetas Verdes*. Burjassot Combatirá Las Inundaciones Mediante Sistemas Para Drenar La Lluvia Con Vegetación. <https://www.lasprovincias.es/hortamorvedre/burjassot-combatira-inundaciones-20180306001849-ntvo.html>
- PA. (2020). *Tubos de hormigón*. Prefabricados Del Austro.
<https://prefabricadodelaustro.com/>
- Plastigama. (2023). *Tuberías de PVC*. Tuberías de PVC Para Alcantarillado Novafort Plus.
<https://www.wavin.com/es-ec/products/5d59dbd0-9f2c-4ddf-8492-1c116305357b>
- PUGS, P. de U. y G. del S. (2022). *Componente Estructurante y Componente Urbanístico*.
<https://www.cuenca.gob.ec/content/pdot-pugs-2022>
- Quiroz, G., & Becerra, R. (2018). *Pozo de infiltración*.
<https://hidroextrema.blogspot.com/2008/09/pozos-de-infiltracin.html>
- Rodriguez, J. (2013). *Nuevas tendencias en la gestión de drenaje pluvial en una cuenca urbana*. 216. https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE000523.pdf
- Rossmann, L. (2015). Storm Water Management Model (SWMM) User ' s Manual Version 5 .2.1. In *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)* (Issue September).
- Rossmann, L. A., & Huber, W. C. (2016). Storm Water Management Model Reference Manual. In *U.S. Environmental Protection Agency: Vol. I* (Issue January).
www2.epa.gov/water-research
- Ryan. (2023). *Rain Barrel*. This Stacked Rain Barrel System Helps You Collect Rain Water For Your Garden. <https://oddiy.com/stacked-rain-barrel-rain-water-collection->

system

Santamaría, P. (2016). *Los tejados verde mas curiosos del mundo*. ABC Viajar. https://www.abc.es/viajar/top/abci-tejados-verdes-mas-curiosos-mundo-201610061406_noticia.html

Sañudo, L. A., Rodrigue, J., & Castro, D. (2012). *Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)* (Issue October). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1647.6003/1>

SENAGUA. (1992). Normas Para Estudio De Sistemas De Abastecimiento De Agua Potable Y Disposición De Aguas Residuales Para Poblaciones Mayores a 1000 Habitantes. In *Código Ecuatoriano de la Construcción* (Issue 6). http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/norma_urbana_para_estudios_y_disenos.pdf

Valbuena, M. (2016). *Rehabilitación de redes de alcantarillado mediante técnicas LID, usando SWMM5 en un caso real*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/99124?show=full>

Woods Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, B., & Shaffer, P. (2007). *The SuDS manual* (Primera). CIRIA.

Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale - Clarke, H., Scott, T., Achley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SUDS manual*. In *CIRIA*. <http://www.persona.uk.com/A47postwick/deposit-docs/DD-181.pdf>

7. Anexos

7.1 Anexo A. Discretización de subcuencas.

SUBCUENCA	Área (m ²)	TIPO DE SUPERFICIE	N-Manning	CN
S-1	5595.94	cubiertas	0.012	95
	1669.56	calles	0.015	98
	1377.74	patios/parqueaderos	0.014	98
	1782.44	áreas verdes		74
S-2	2119.14	cubiertas	0.012	95
	802.45	calles	0.015	98
	1672.87	áreas verdes		74
S-3	1579.75	calles	0.015	98
	2111.18	cubiertas	0.012	95
	1423.31	verdes		74
S-4	1687.75	calles	0.015	98
	2769.38	cubiertas	0.012	95
	4404.62	áreas verdes		74
S-5	2082.64	calles	0.015	98
	197.42	patios/parqueaderos	0.014	98
	3494.37	cubiertas	0.012	95
	1785.11	áreas verdes		74
S-6	1680.00	calles	0.015	98
	812.67	patios/parqueaderos	0.014	98
	3326.81	cubiertas	0.012	95
	2833.21	áreas verdes		74
S-7	2202.00	calles	0.015	98
	505.44	patios/parqueaderos	0.014	98
	7279.50	cubiertas	0.012	95
	6315.66	áreas verdes		74
S-8	2901.33	calles	0.015	98
	6391.51	cubiertas	0.012	95
	4107.28	áreas verdes		74
S-9	3819.05	cubiertas	0.012	95
	1961.00	calles	0.015	98
	4993.99	áreas verdes		74
S-10	2421.00	calles	0.015	98
	3976.14	cubiertas	0.012	95
	156.40	patios/parqueaderos	0.014	98
	2532.59	áreas verdes		74
S-11	5439.68	calles	0.015	98
S-12	19963.82	cubiertas	0.012	95
	8240.53	calles	0.015	98
	9724.78	patios/parqueaderos	0.014	98
	24710.22	áreas verdes		74

S-13	2111.00	calles	0.015	98
	2807.40	cubiertas	0.012	95
	871.24	áreas verdes		74
S-14	1066.27	cubiertas	0.012	95
	1198.00	calles	0.015	98
	3572.80	áreas verdes		74
S-15	2728.20	calles	0.015	98
	2429.00	patios/parqueaderos	0.014	98
	1434.70	cubiertas	0.012	95
	6960.00	áreas verdes		74
S-16	3282.30	calles	0.015	98
	597.30	patios/parqueaderos	0.014	98
	2671.00	cubiertas	0.012	95
	3214.99	áreas verdes		74
S-17	1314.00	calles	0.015	98
	1069.00	patios/parqueaderos	0.014	98
	2440.00	cubiertas	0.012	95
	1481.30	áreas verdes		74
S-18	1711.00	calles	0.015	98
	2970.00	cubiertas	0.012	95
	169.00	patios/parqueaderos	0.014	98
	1397.91	áreas verdes		74

Anexo A.1. Clasificación de superficies, coeficientes de rugosidad N-Manning, número de curva CN.

Subcuenca	Área (Ha)	Área (m ²)	Longitud (m)	Width	Slope (%)	% Imperv
S-1	1.043	10425.676	114.531	91.029	11.091	82.9
S-2	0.459	4594.456	115.332	39.837	15.857	63.6
S-3	0.511	5114.240	89.848	56.921	14.264	72.2
S-4	0.886	8861.748	120.502	73.541	7.978	50.3
S-5	0.756	7559.536	114.154	66.222	13.549	76.4
S-6	0.865	8652.627	181.248	47.739	13.466	67.3
S-7	1.630	16302.599	109.664	148.660	9.033	61.3
S-8	1.340	13400.115	177.411	75.531	9.695	69.3
S-9	1.077	10774.038	109.938	98.001	19.935	53.6
S-10	0.909	9086.133	115.336	78.780	11.564	72.1
S-11	0.544	5439.684	193.489	28.114	6.393	100.0
S-12	6.706	67064.753	278.852	240.503	10.852	63.2
S-13	0.579	5789.645	133.550	43.352	17.753	85.0
S-14	0.584	5837.069	82.385	70.851	27.586	38.8
S-15	1.355	13551.899	132.496	102.282	18.610	48.6
S-16	0.977	9765.593	185.152	52.744	8.743	67.1

S-17	0.630	6304.295	82.665	76.263	10.527	76.5
S-18	0.625	6248.214	105.729	59.097	8.398	77.6

Anexo A.2. Área, longitud, ancho, pendiente media y porcentaje de impermeabilidad de cada subcuenca.

Subcuenca	N-Imperv	N-Perv	Dstore-imperv (mm)	Dstore-perv (mm)	%Zero-Imperv	CN	NODO DE SALIDA
S-1	0.0129	0.13	2.5	9	25	92.28	N-C8
S-2	0.0128	0.13	2.5	9	25	87.87	N-C13
S-3	0.0133	0.13	2.5	9	25	90.08	N-C42
S-4	0.0131	0.13	2.5	9	25	85.13	N-C54
S-5	0.0132	0.13	2.5	9	25	90.94	N-C17
S-6	0.0131	0.13	2.5	9	25	88.98	N-C5
S-7	0.0128	0.13	2.5	9	25	87.36	N-C21
S-8	0.0129	0.13	2.5	9	25	89.21	N-C44
S-9	0.0130	0.13	2.5	9	25	85.81	N-C61
S-10	0.0132	0.13	2.5	9	25	89.99	N-C66
S-11	0.0150	0.13	2.5	9	25	98	N-C26
S-12	0.0130	0.13	2.5	9	25	88.06	N-C22
S-13	0.0133	0.13	2.5	9	25	92.93	N-C25
S-14	0.0136	0.13	2.5	9	25	82.76	N-C37
S-15	0.0140	0.13	2.5	9	25	85.35	N-C49
S-16	0.0137	0.13	2.5	9	25	89.27	N-C76
S-17	0.0133	0.13	2.5	9	25	91.19	N-C72
S-18	0.0131	0.13	2.5	9	25	91.2	N-C74

Anexo A.3. Coeficiente de rugosidad de área impermeable y área permeable. Almacenamiento en depresión de área impermeable y permeable. Numero de curva para para perdidas por infiltración. Nodos de salida.

Subcuencas	TRAMO	Área (Ha)	N° Conexiones Agua Potable	Población de servicio (habitantes)
S-1	N-C7 - N-C8	0.27	10	40
	N-C10 - N-C8	0.78	15	60
S-2	N-C11 - N-C13	0.46	21	84
S-3	N-C41 - N-C42	0.34	6	24
	N-C55 - N-C42	0.17	3	12
S-4	N-C56 - N-C54	0.53	18	72
	N-C50 - N-C54	0.35	7	28
S-5	N-C15 - N-C17	0.61	13	52

	N-C13 - N-C17	0.12	3	12
	N-S21 - N-S22	0.03	5	20
S-6	N-C1 - N-C5	0.87	11	44
S-7	N-C17 - N-C21	0.34	11	44
	N-S22 - N-S23	0.23	3	12
	N-C19 - N-C21	0.19	6	24
	N-S36 - N-S23	0.87	6	24
S-8	N-C42 - N-C43	0.33	7	28
	N-S26 - N-S28	0.38	8	32
	N-C43 - N-C44	0.22	1	4
	N-S28 - N-S29	0.41	3	12
S-9	N-C54 - N-C61	0.28	5	20
	N-C62 - NC61	0.39	3	12
	N-S37 - N-C64	0.42	4	16
S-10	N-C64 - N-C66	0.49	11	44
	N-C68 - NC66	0.41	5	20
S-11			0	0
S-12	N-S1 - N-S10	1.13	6	24
	N-S8 - N-S10	0.60	5	20
	N-S10 - N-C22	4.99	0	0
S-13	N-S23 - N-S24	0.08	6	24
	N-C21 - N-C6	0.10	2	8
	N-S24 - N-C24	0.48	7	28
S-14	N-C32 - N-C37	0.19	3	12
	N-C35 - N-C37	0.40	7	28
S-15	N-C44 - N-C49	0.42	1	4
	N-S29- N-C49	0.48	3	12
	N-C47 - NC49	0.45	6	24
S-16	N-P1 - N-C77	0.35	26	104
	N-S32 - N-C76	0.62	23	92
S-17	N-C71- N-C72	0.34		
	N-C66 - N-C72	0.29	6	24
S-18	N-C72 - NC74	0.62	17	68

Anexo A.4. Estimación del número de habitantes en cada tramo por cantidad de conexiones del servicio de agua potable.

TRAMO	Total Qmd (L/s)	QMH (L/s)	Q infiltraciones (L/s)	Q ilícitas (L/s)	QAR Total (L/s)	Nodo de aporte
N-C7 - N-C8	0.10	0.26	0.01	0.03	0.30	N-C7
N-C10 - N-C8	0.15	0.40	0.04	0.08	0.51	N-C10
N-C11 - N-C13	0.21	0.56	0.02	0.05	0.63	N-C11
N-C41 - N-C42	0.06	0.16	0.02	0.03	0.21	N-C41
N-C55 - N-C42	0.03	0.08	0.01	0.02	0.11	N-C55

N-C56 - N-C54	0.18	0.48	0.03	0.05	0.56	N-C56
N-C50 - N-C54	0.07	0.19	0.02	0.04	0.24	N-C50
N-C15 - N-C17	0.13	0.34	0.03	0.06	0.44	N-C15
N-C13 - N-C17	0.03	0.08	0.01	0.01	0.10	N-C13
N-S21 - N-S22	0.05	0.13	0.00	0.00	0.14	N-S21
N-C1 - N-C5	0.11	0.29	0.04	0.09	0.42	N-C1
N-C17 - N-C21	0.11	0.29	0.02	0.03	0.34	N-C17
N-S22 - N-S23	0.03	0.08	0.01	0.02	0.11	N-S22
N-C19 - N-C21	0.06	0.16	0.01	0.02	0.19	N-C19
N-S36 - N-S23	0.06	0.16	0.04	0.09	0.29	N-S36
N-C42 - N-C43	0.07	0.19	0.02	0.03	0.24	N-C42
N-S26 - N-S28	0.08	0.21	0.02	0.04	0.27	N-S26
N-C43 - N-C44	0.01	0.03	0.01	0.02	0.06	N-C43
N-S28 - N-S29	0.03	0.08	0.02	0.04	0.14	N-S28
N-C54 - N-C61	0.05	0.13	0.01	0.03	0.17	N-C54
N-C62 - NC61	0.03	0.08	0.02	0.04	0.14	N-C62
N-S37 - N-C64	0.04	0.11	0.02	0.04	0.17	N-S37
N-C64 - N-C66	0.11	0.29	0.02	0.05	0.37	N-C64
N-C68 - NC66	0.05	0.13	0.02	0.04	0.19	N-C68
N-S1 - N-S10	0.06	0.16	0.06	0.11	0.33	N-S1
N-S8 - N-S10	0.05	0.13	0.03	0.06	0.22	N-S8
N-S10 - N-C22	1.99	5.31	0.25	0.50	6.05	N-S10
N-S23 - N-S24	0.06	0.16	0.00	0.01	0.17	N-S23
N-C21 - N-C6	0.02	0.05	0.00	0.01	0.07	N-C21
N-S24 - N-C24	0.07	0.19	0.02	0.05	0.26	N-S24
N-C32 - N-C37	0.03	0.08	0.01	0.02	0.11	N-C32
N-C35 - N-C37	0.07	0.19	0.02	0.04	0.24	N-C35
N-C44 - N-C49	0.01	0.03	0.02	0.04	0.09	N-C44
N-S29- N-C49	0.03	0.08	0.02	0.05	0.15	N-S29
N-C47 - NC49	0.06	0.16	0.02	0.05	0.23	N-C47
N-P1 - N-C77	0.26	0.69	0.02	0.04	0.74	N-P1
N-S32 - N-C76	0.23	0.61	0.03	0.06	0.70	N-S32
N-C71- N-C72	0.14	0.36	0.02	0.03	0.41	N-C71
N-C66 - N-C72	0.06	0.16	0.01	0.03	0.20	N-C66
N-C72 - NC74	0.17	0.45	0.03	0.06	0.54	N-C72

Anexo A.5. Estimación de caudal de aporte por aguas residuales.

7.2 Anexo B. Sistemas urbanos de drenaje sostenible

	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
Subcuencas	Rain Barrels Altura 1000mm (#)	Celdas de Bio- retención (m2)	Pavimentos Modulares (m2)
S-1	25		1620.0

S-2	25		0.0
S-3	25		70.0
S-4	25		0.0
S-5	40		115.0
S-6	25		495.0
S-7	25		291.0
S-8	20		428.0
S-9	25		65.0
S-10	25		366.0
S-11	0	750.0	3128.0
S-12	30	500.0	9673.0
S-13	25		0.0
S-14	25	562.5	220.0
S-15	25	400.0	3470.0
S-16	30		140.0
S-17	25		285.0
S-18	25		235.0
Total, SUDS empleados	445	2212.5	20601

Numero de barriles de lluvia utilizados. Área ocupada por sistemas de bioretención y pavimentos permeables.

7.3 Anexo C. Ajustes de parámetros por implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Subcuencas	% Imperv	% imperv para cubiertas	% Area Imperv Tratada	Nuevo ancho W (m)
S-1	82.90	53.67	64.73	42.17
S-2	63.58	22.85	35.93	30.74
S-3	72.161	41.28	57.19	33.42
S-4	50.29	31.25	62.13	50.56
S-5	76.38	46.22	60.50	35.61
S-6	67.25	38.45	57.16	29.38
S-7	61.25	44.65	72.88	82.28
S-8	69.34	47.7	68.78	39.5
S-9	53.647	35.45	66.07	63.26
S-10	72.12	43.76	60.67	44.31
S-11	100	0	0	0
S-12	63.15	36.37	57.58	153.02
S-13	84.95	48.49	57.07	22.33
S-14	38.79	18.27	47.09	57.91
S-15	48.64	10.5867081	21.76	91.45
S-16	67.07	27.3511292	40.77	38.32

S-17	76.50	38.7037709	50.59	46.75
S-18	77.62	47.538383	61.23	31

Anexo C.1. Ajuste del nuevo valor de ancho para cada subcuenca. Porcentaje de área que será tratada por la implementación de barriles de lluvia – Escenario 1.

Subcuencas	Área a tratar (m ²)	Área imperv total (m ²)	% Área a tratar	Área ocupada SUDS (m ²)	Nuevo % Imperv	Nuevo ancho W (m)
S-11	5439.68	5439.68	100.00	750.00	93.11	26.18
S-12	17965.31	42354.53	42.42	500.00	62.78	153.04
S-14	1198.00	2264.27	52.91	562.50	35.58	57.91
S-15	2728.20	6591.90	41.39	400.00	45.69	91.45

Anexo C.2. Ajuste del nuevo valor de ancho y porcentaje de área impermeable para las subcuencas donde se emplearán sistemas de bioretención – Escenario 2.

SUB-CUENCAS	Áreas Parqueaderos (m ²)	Áreas camineras (m ²)	Áreas veredas (m ²)	TOTAL (m ²)	Nuevo % Imperv	% Área Imperv Tratar	Nuevo ancho W (m)
S-1	1620.00	0	0	1620.0	67.36	22.61	28.02
S-2	0	0	0	0.0	63.59	0.00	30.74
S-3	0	70.00	0	70.0	70.80	2.63	32.64
S-4	0	0	0	0.0	50.30	0.00	50.56
S-5	0	0	115.00	115.0	74.86	2.61	34.60
S-6	495.00	0	0	495.0	61.54	12.65	26.65
S-7	70.00	0	221.00	291.0	59.47	4.76	79.63
S-8	0	428.00	0	428.0	66.15	6.64	37.09
S-9	65.00	0	0	65.0	53.04	2.10	62.67
S-10	151.00	215.00	0	366.0	68.10	7.74	41.13
S-11	2800.00	0	328.00	3128.0	42.50	57.50	10.01
S-12	5650.00	4023.00	0	9673.0	48.73	36.16	118.35
S-13	0	0	0	0.0	84.95	0.00	22.33
S-14	0	0	220.00	220.0	35.02	25.05	55.24
S-15	2300.00	270.00	900.00	3470.0	23.04	108.22	65.26
S-16	0	0	140.00	140.0	65.64	3.19	37.56
S-17	285.00	0	0	285.0	71.98	7.72	43.30
S-18	0	0	235.00	235.0	73.87	6.24	28.78

Anexo C.3. Ajuste del nuevo porcentaje de impermeabilidad, valor de ancho y porcentaje de área impermeable a tratar en cada subcuenca donde se emplearán pavimentos permeables – Escenario 3.

7.4 Anexo D. Resultados de los escenarios modelados.

Conducto	V (m/s)				y/D			
	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
C-1	3.85	3.85	3.85	3.37	0.86	0.86	0.86	0.81
C-2	4.5	4.46	4.46	4.35	0.75	0.75	0.75	0.64
C-3	3.77	3.77	3.77	3.65	0.88	0.88	0.88	0.83
C-4	3.43	3.44	3.44	3.44	1	1	1	0.82
C-5	0.62	0.62	0.62	0.62	0.36	0.36	0.36	0.26
C-6	3.99	3.97	3.97	3.21	1	1	1	0.82
C-7	4.79	4.58	5.17	5.15	1	1	1	0.87
C-8	0.72	0.74	0.74	0.51	1	1	1	0.39
C-9	3.84	3.84	3.84	3.17	0.84	0.84	0.84	0.6
C-10	4.75	4.75	4.75	4.19	0.84	0.68	0.68	0.48
C-11	2.63	2.38	2.38	2.35	0.6	0.46	0.46	0.46
C-12	2.23	1.78	1.78	2.41	0.81	0.62	0.62	0.48
C-13	5.67	5.54	5.54	4.95	1	0.75	0.75	0.51
C-14	5.44	5.08	5.08	4.62	1	0.82	0.82	0.54
C-15	0.71	0.71	0.71	0.71	0.04	0.04	0.04	0.04
C-16	0.59	0.59	0.59	0.59	0.52	0.17	0.14	0.04
C-17	4.97	4.92	4.72	4.36	1	0.77	0.74	0.57
C-18	4.67	4.67	4.35	4.08	1	0.91	0.79	0.59
C-19	3.69	3.68	3.68	3.5	0.82	0.82	0.82	0.81
C-20	2.9	2.67	2.7	2.88	0.74	0.74	0.74	0.59
C-21	4.21	4.13	4.07	3.96	1	1	0.9	0.68
C-22	2.59	2.59	2.59	2.59	1	1	1	1
C-23	3.8	3.75	3.75	3.75	1	1	1	1
C-24	4.92	5.03	5.24	4.79	1	1	1	1
C-25	3.88	3.88	4.3	4.32	1	1	1	1
C-30	4.04	4.04	3.74	3.32	1	1	1	1
C-31	2.88	2.84	2.95	2.92	1	1	1	1
C-32	2.98	2.99	2.97	2.94	1	1	1	1
C-33	2.98	2.99	2.97	2.94	1	1	1	1
C-34	3.13	3.07	3.01	3.06	1	1	1	0.93
C-35	4.85	4.85	4.85	4.85	1	0.83	0.82	0.74
C-36	5.42	5.43	5.41	5.36	1	0.72	0.71	0.67
C-37	5.08	4.91	4.88	4.61	1	0.89	0.89	0.86
C-39	1.8	1.55	1.3	1.17	0.6	0.41	0.28	0.23
C-40	2.47	2.19	1.88	1.69	0.47	0.32	0.22	0.17
C-41	1.61	0.91	0.49	0.34	0.67	0.62	0.58	0.57
C-42	0.65	0.65	0.65	0.65	0.03	0.03	0.03	0.03
C-43	0.9	0.9	0.9	0.9	0.51	0.51	0.51	0.51
C-44	4.98	4.77	4.74	4.49	1	0.94	0.94	0.89
C-45	0.6	0.6	0.6	0.6	0.61	0.57	0.52	0.06

C-46	1.25	1.1	0.46	0.29	1	1	1	0.54
C-47	2.6	2.27	2.23	1.89	1	1	1	0.7
C-48	2.55	1.99	1.76	1.84	0.77	0.72	0.67	0.56
C-49	4.5	4.5	4.49	4.43	0.81	0.81	0.81	0.71
C-50	4.72	4.74	4.81	4.86	0.5	0.47	0.44	0.41
C-51	5.68	5.5	5.12	4.71	0.47	0.43	0.37	0.32
C-52	3.23	2.88	2.32	1.97	0.75	0.73	0.7	0.64
C-53	2.59	2.33	2.18	1.8	1	1	1	0.68
C-54	1.6	1.31	0.77	0.16	1	1	1	0.42
C-55	0.59	0.59	0.59	0.59	0.36	0.24	0.24	0.24
C-56	3.05	2.69	2.69	2.69	0.74	0.46	0.46	0.46
C-57	4.05	3.63	3.63	3.63	0.57	0.36	0.36	0.36
C-58	5.34	4.36	4.36	4.36	0.46	0.32	0.32	0.32
C-60	0.82	0.82	0.82	0.82	0.3	0.21	0.21	0.21
C-61	3.5	2.9	2.9	2.9	0.41	0.28	0.28	0.28
C-62	3.65	3.01	3.01	3.01	0.4	0.28	0.28	0.28
C-63	3.02	2.27	2.26	2.27	0.48	0.35	0.36	0.35
C-64	5.39	4.78	4.87	4.84	0.57	0.43	0.44	0.44
C-65	3.72	2.78	2.81	2.8	0.79	0.67	0.7	0.69
C-66	3.72	2.74	2.78	2.77	0.79	0.67	0.7	0.69
C-67	3.72	2.72	2.73	2.92	0.79	0.72	0.73	0.72
C-68	3.83	3.47	3.61	3.11	1	1	1	1
C-69	0.47	0.47	0.47	0.47	0.51	0.51	0.51	0.51
C-70	0.43	0.43	0.43	0.43	0.02	0.02	0.02	0.02
C-72	0.5	0.5	0.5	0.5	0.02	0.02	0.02	0.02
C-73	0.34	0.34	0.34	0.34	0.51	0.51	0.51	0.51
C-74	4.34	4.21	4.21	4.14	0.56	0.53	0.54	0.49
C-75	2.86	2.78	2.79	2.71	0.8	0.78	0.79	0.72
C-76	2.85	2.62	2.67	2.5	0.83	0.8	0.81	0.73
C-77	4.68	4.54	4.59	4.39	0.74	0.64	0.66	0.59
C-78	3.98	3.91	3.93	3.81	0.91	0.72	0.75	0.66
C-79	4.55	4.54	4.55	4.46	1	0.77	0.8	0.69
C-80	4.73	4.73	4.73	4.73	0.79	0.79	0.79	0.79
C-81	5.7	5.76	5.75	5.68	0.66	0.66	0.66	0.66
C-82	6.21	6.21	6.21	6.21	0.61	0.61	0.61	0.61
C-83	7.92	7.92	7.92	7.92	0.5	0.5	0.5	0.5
C-84	4.97	4.97	4.97	4.97	0.77	0.77	0.77	0.77
C-85	4.91	4.91	4.91	4.91	0.78	0.78	0.78	0.78
C-86	4.91	4.91	4.91	4.91	0.78	0.78	0.78	0.78
C-87	4.63	4.63	4.63	4.63	0.83	0.83	0.83	0.83
C-88	5.67	5.53	5.56	5.6	0.77	0.83	0.83	0.83
C-89	5.16	5.13	5.14	5.14	0.9	1	1	1
C-90	5.12	5.12	5.27	5.12	1	1	1	1
C-91	4.15	4.13	4.34	4.17	1	1	1	1

C-92	3.92	3.83	4.02	3.95	1	1	1	1
C-93	3.29	3.18	3.55	3.44	1	1	1	1
C-97	0.54	0.54	0.54	0.54	0.03	0.03	0.03	0.03
C-98	0.17	0.17	0.17	0.17	0.28	0.28	0.28	0.28
C-99	2.4	2.4	2.4	2.4	1	1	1	1
C-100	0.69	0.69	0.69	0.69	0.03	0.03	0.03	0.03
C-101	0.44	0.44	0.44	0.44	0.06	0.06	0.06	0.06
C-102	0.66	0.66	0.66	0.66	0.08	0.08	0.08	0.08
C-103	0.85	0.85	0.85	0.85	0.54	0.54	0.54	0.54
C-104	2.64	2.64	2.67	1.82	1	1	1	1
C-105	0.68	0.68	0.68	0.68	0.06	0.06	0.06	0.06
C-106	0.94	0.94	0.94	0.94	0.04	0.04	0.04	0.04
C-107	0.59	0.59	0.59	0.59	0.05	0.05	0.05	0.05
C-108	0.72	0.72	0.72	0.72	0.05	0.05	0.05	0.05
C-109	0.87	0.87	0.87	0.87	0.06	0.06	0.06	0.06
C-110	0.62	0.62	0.62	0.62	0.54	0.53	0.53	0.09
C-111	1.24	1.09	0.46	0.33	1	1	1	0.56
C-112	0.67	0.67	0.67	0.67	0.04	0.04	0.04	0.04
C-113	0.26	0.26	0.26	0.26	0.52	0.46	0.47	0.47
C-114	4.9	4.9	4.9	4.9	0.07	0.07	0.07	0.07
C-115	0.75	0.75	0.75	0.75	0.08	0.08	0.08	0.08
C-116	0.75	0.75	0.75	0.75	0.08	0.07	0.07	0.07
C-117	1.06	1.06	1.06	1.06	0.54	0.53	0.53	0.53
C-118	2.58	2.58	2.58	2.58	0.52	0.36	0.38	0.36
C-119	2.93	2.67	2.71	2.69	1	0.73	0.77	0.73
C-120	3.47	3.2	3.2	3.2	0.82	0.61	0.65	0.61
C-121	3.68	2.64	2.78	2.64	0.82	0.72	0.73	0.72
C-122	4.34	4.02	4.15	3.72	0.83	0.81	0.81	0.79
C-38	5.07	5.07	5.07	5.06	1	0.94	0.94	0.78

7.5 Anexo E. Mapa de implementación ubicación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en zona de estudio.

