

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM)

**EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA
MEDIANTE EL USO DE LA HERRAMIENTA SWMM. CASO
DE ESTUDIO: DURÁN.**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de

MAGÍSTER EN CAMBIO CLIMÁTICO

Presentado por:

JAVIER EDUARDO REAL ROJAS

Dirigido por:

Jochen Hack, PhD.

Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania

Gladys Rincón, PhD.

Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Guayaquil - Ecuador

2021

COMITÉ EVALUADOR



Firmado electrónicamente por:
MERCY JULIA
BORBOR
CORDOVA

MERCY JULIA BORBOR CORDOVA, PhD.
DELEGADA DEL DECANATO DE FIMCM



Firmado electrónicamente por:
GLADYS RINCÓN POLO

GLADYS RINCÓN POLO, PhD.
TUTORA

JOCHEN HACK, PhD.
COTUTOR

Firmado digitalmente
por DAVID ENRIQUE
MATAMOROS
CAMPOSANO
Fecha: 2021.10.04
16:17:42 -05'00'

DAVID ENRIQUE MATAMOROS CAMPOSANO, PhD.
EVALUADOR DEL DECANATO DE LA FACULTAD

Índice de contenido

Capítulo I.: Planteamiento del problema	1
I.1. Objetivo general	10
I.1.1. Objetivos específicos	10
Capítulo II.: Marco Teórico	11
II.1. Antecedentes	11
II.2. Tipos de espacios verdes urbanos	13
II.3. Servicios ecosistémicos	15
II.4. Componentes del sistema de infraestructura verde	17
II.5. Infraestructura verde como mecanismo de gestión del agua	19
II.6. Objetivos de una infraestructura verde-azul	20
II.7. Elementos de una infraestructura verde-azul	21
II.8. Tipologías aplicables en las zonas urbanas	22
II.9. Modelación de escorrentía	24
II.10. Storm Water Management Model	25
Capítulo III. Metodología	29
III.1. Región de Estudio	29
III.2. Paso 1: Selección del sector de estudio	30
III.3. Paso 2: Selección de tipo de infraestructura verde	32
III.4. Paso 3: Modelar y comparar la gestión de la escorrentía	32
Capítulo IV.: Resultados	43
IV.1. Selección del sector de estudio	43
IV.2. Análisis del sector de estudio	55
IV.3. Modelar y comparar la gestión de la escorrentía	65

Capítulo V.: Discusión	83
Capítulo VI.: Conclusiones	87
Capítulo VII.: Referencias bibliográficas	89

Índice de tablas

Tabla 1.1. Tipos de infraestructura verde para control de inundaciones	7
Tabla 2.1. Potenciales espacios funcionales como infraestructura verde	14
Tabla 2.2. Resumen de los servicios ecosistémicos	16
Tabla 2.3. Objetivos fundamentales de una infraestructura verde-azul	20
Tabla 2.4. Tipos de infraestructura verde-azul	22
Tabla 2.5. Modelos para simular sistemas de gestión de aguas pluviales	24
Tabla 3.1. Criterios para la selección del sector de estudio	31
Tabla 3.2. Ecuaciones pluviométricas para cada periodo de recurrencia	35
Tabla 3.3. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 2 años	36
Tabla 3.4. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 5 años	37
Tabla 3.5. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 10 años	38
Tabla 3.6. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 25 años	39
Tabla 3.7. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 50 años	40
Tabla 4.1. Sectores del Cantón Durán con uso de suelo residencial	43
Tabla 4.2. Sectores del Cantón Duran con red de alcantarillado pluvial	47
Tabla 4.3. Sectores del Cantón Duran con suelo impermeabilizado	50
Tabla 4.4. Sectores del Cantón Duran con riesgo muy alto ante inundaciones	52
Tabla 4.5. Metros cuadrados de áreas verdes de potenciales sectores de estudio	55
Tabla 4.6. Volúmenes de inundación del escenario actual vs. el escenario verde	75
Tabla 4.7. Comparación de volúmenes de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con jardines de lluvia	76
Tabla 4.8. Comparación de volúmenes de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con celda de bio-retención	76

Tabla 4.9. Comparación de volúmenes de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con pavimento permeable	77
Tabla 4.10. Picos de inundación del escenario actual vs. el escenario verde	80
Tabla 4.11. Comparación de picos de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con jardines de lluvia	81
Tabla 4.12. Comparación de picos de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con celda de bio-retención	82
Tabla 4.13. Comparación de picos de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con pavimento permeable	82

Índice de figuras

Figura 1.1. Mapa general del Cantón Durán	2
Figura 1.2. Mapa de riesgo ante inundaciones	4
Figura 2.1. Impacto de la urbanización sobre la ecología fluvial	12
Figura 2.2. Funciones de la infraestructura verde	17
Figura 4.1. Mapa del modelo de uso de suelo del Cantón Durán 2019-2023	46
Figura 4.2. Mapa de la red de alcantarillado pluvial del Cantón Durán	49
Figura 4.3. Mapa de la red vial del Cantón Durán	51
Figura 4.4. Mapa de riesgo ante inundaciones	53
Figura 4.5. Mapa de ubicación del sector de estudio	56
Figura 4.6. Calle principal de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo	57
Figura 4.7. Parque principal de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo	58
Figura 4.8. Parqueadero público de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo	59
Figura 4.9. Rieles entre la 3ra. y 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo	60
Figura 4.10. Parterre central de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo	61
Figura 4.11. Acera más ancha de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo	62
Figura 4.12. Ubicación de las infraestructuras verdes seleccionadas	64
Figura 4.13. Opciones de simulación seleccionadas del SWMM	66
Figura 4.14. Parámetros ingresados para las celdas de bio-retención	69
Figura 4.15. Plano esquemático de las celdas de bio-retención	70
Figura 4.16. Parámetros ingresados para los jardines de lluvia	71
Figura 4.17. Plano esquemático de los jardines de lluvia	71
Figura 4.18. Parámetros ingresados para el pavimento permeable	73
Figura 4.19. Plano esquemático del pavimento permeable	73

Figura 4.20. Visualización del modelo ya concluido	74
Figura 4.21. Hidrograma de escenario actual para cada periodo de recurrencia	78
Figura 4.22. Hidrograma de “escenario verde” para cada periodo de recurrencia	78
Figura 4.23. Hidrograma de jardín de lluvia para cada periodo de recurrencia	79
Figura 4.24. Hidrograma de celda de bio-retención por cada periodo de recurrencia	79
Figura 4.25. Hidrograma de pavimento permeable por cada periodo de recurrencia	80

RESUMEN

La ciudad de Durán es vulnerable ante fenómenos climáticos extremos como las inundaciones, gracias a la combinación de diversos factores tanto naturales como antrópicos, dando como resultado que el 40% de la misma presenta niveles de riesgo altos ante inundaciones. Debido a esta realidad, es fundamental que se establezcan medidas locales enfocadas en la reducción de vulnerabilidad y aumento de resiliencia.

La infraestructura verde urbana es una alternativa a considerar para el control de las inundaciones, ya que la misma tiene la capacidad de almacenar, infiltrar, evaporar o retener la escorrentía cerca de su punto de origen, evitando el colapso del sistema de alcantarillado pluvial. El presente proyecto tiene como objetivo evaluar el desenvolvimiento de la infraestructura verde urbana, que al ser implementada en un sector específico del Cantón Durán, permita un control más eficiente de la escorrentía de la zona. Se ha establecido una metodología dividida en tres pasos: Selección del sector de estudio, Selección de tipo de infraestructura verde y Simulación de la gestión de la escorrentía.

El sector de estudio fue la quinta etapa de la ciudadela El Recreo y se seleccionó las siguientes infraestructuras verdes: jardín de lluvia, celda de bio-retención y pavimento permeable. Al comparar los resultados obtenidos de la simulación de implementación de las infraestructuras verdes, respecto con la situación actual, se evidenció una reducción de hasta un 32% en los volúmenes de inundación y hasta un 30% en los picos de inundación, es decir que su implementación sí es viable para reducir el impacto de las inundaciones en la ciudad de Durán.

Palabras clave: Ciudad, inundaciones, infraestructura verde urbana, riesgo, vulnerabilidad.

ABSTRACT

Durán City is vulnerable to extreme climatic phenomena such as floods, thanks to the combination of various natural and anthropic factors, as a result, 40% of the city has high risk levels of flooding. Due to this reality, it is essential to establish local measures focused on reducing vulnerability and increasing resilience.

Urban green infrastructure is an alternative to consider for flood control, since it has the capacity to store, infiltrate, evaporate or retain runoff near its point of origin, avoiding the collapse of the storm sewer system. The objective of this project is to evaluate the performance of urban green infrastructure, which, when implemented in a specific sector of Durán City, allows a more efficient control of runoff in the area. A methodology divided into three steps has been established: Selection of the study sector, Selection of type of green infrastructure and Simulation of runoff management.

The study sector was the fifth stage of the El Recreo citadel and the following green infrastructures were selected: rain garden, bio-retention cell and permeable pavement. When comparing the results obtained from the simulation of implementation of green infrastructures, with the current situation, a reduction of up to 32% in flood volumes and up to 30% in flood peaks was evidenced, therefore, the implementation of urban green infrastructure is feasible to reduce the impact of floods in Durán City.

Keywords: City, floods, urban green infrastructure, risk, vulnerability.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Durán (ver Figura 1.1.) se encuentra ubicada en la orilla oriental del Río Guayas, a 60 kilómetros de la desembocadura del Golfo de Guayaquil en el Océano Pacífico, es decir en una zona de transición entre el agua dulce del continente y el agua salada del océano. Limita al norte con el Río Babahoyo, al sur con el Cantón Naranjal, al este con el Cantón Yaguachi y al oeste con el Río Guayas (Plett, 2019). Posee una superficie total de 340,39 km², de los cuales 90,24 km² corresponden al área urbana, la cual ha experimentado un acelerado crecimiento poblacional, puesto que entre los años 1990 al 2010, pasó de tener una población de 85.196 habitantes a 235.769 habitantes, es decir que en un lapso de 20 años su población prácticamente se triplicó (INEC, 2019).

Durán se encuentra asentada sobre lo que originalmente era un ecosistema estuarino, dominado por manglares, lagunas y canales, es decir una zona inundable. Presenta elevaciones que oscilan entre los 0 – 10 metros sobre el nivel del mar, sin embargo, hay zonas de la ciudad que se encuentran en cotas por debajo del nivel de los ríos circundantes (Sousa, 2018). De acuerdo con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la precipitación anual es de 1.026 mm, habiendo ocurrido la precipitación máxima registrada el 2 de marzo del año 2013, con 166 mm en un periodo de 10 horas. En promedio, los periodos de precipitación más severos (tormentas) presentan un valor de 50 mm/h durante un lapso de dos horas. Así mismo, la ciudad presenta en promedio temperaturas mínimas de 21. 8° C y máximas de 32. 5° C (INAMHI, 2019).

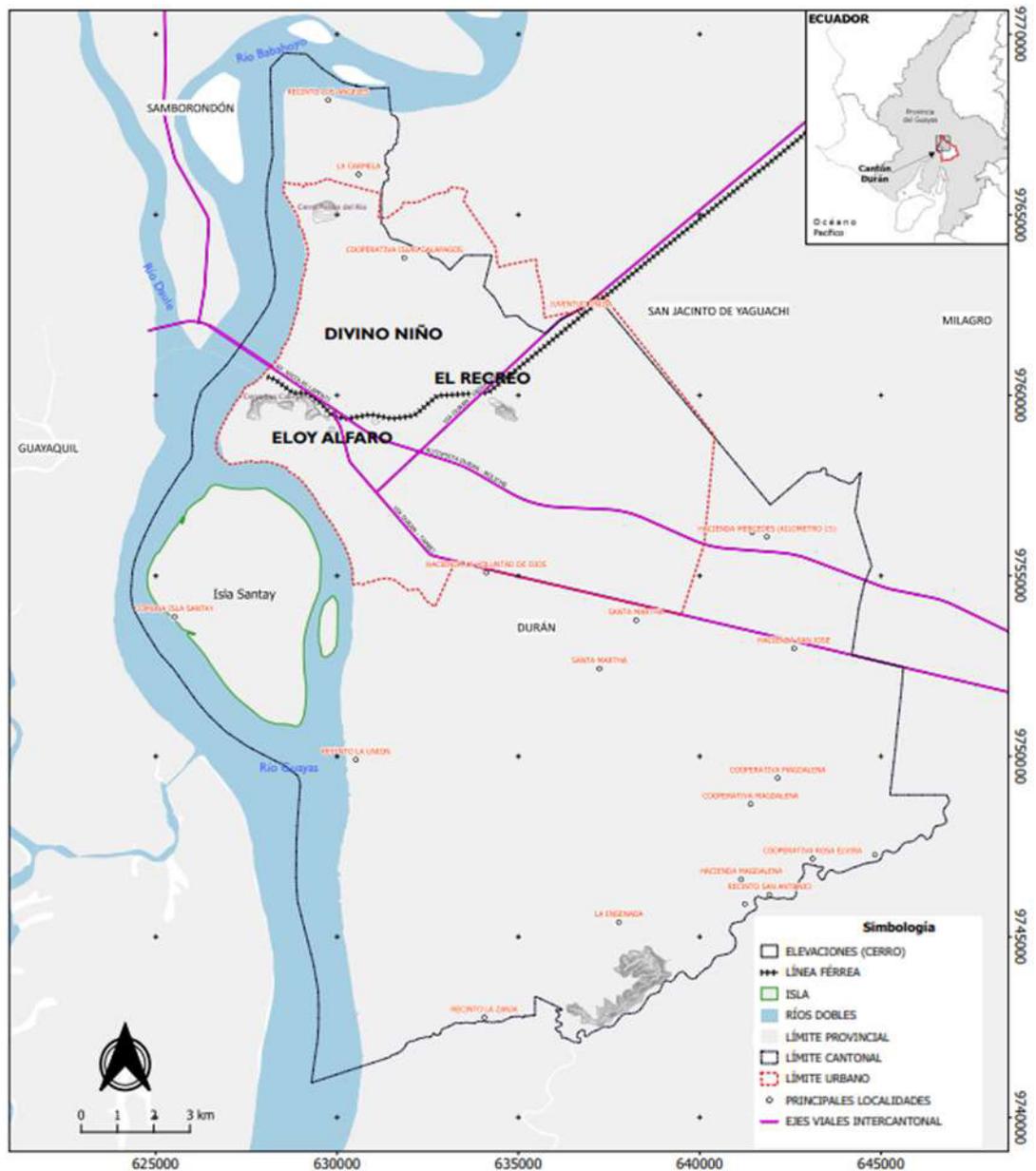


Figura 1.1. Mapa general del Cantón Durán.

Fuente: Proyecto RESCLIMA. (2019).

En las últimas décadas, la ciudad experimentó un crecimiento exponencial, el cual no fue debidamente controlado y planificado por las autoridades locales, dando como resultado que el 50% del área urbana esté comprendida por asentamientos irregulares, los cuales no poseen acceso a ningún tipo de servicio básico y fueron

desarrollados sin tomar en consideración la hidrología y topografía de la zona. Además, únicamente el 25% de la población del cantón cuenta con el servicio de alcantarillado pluvial y alcantarillado sanitario y el 40% de la población tiene acceso a agua potable por tubería, sin embargo, el suministro de agua no es constante y se limita a cuatro días a la semana durante seis horas, de tal manera que los usuarios deben racionar el consumo (EMAPAD – EP, 2019).

La combinación de los factores antes mencionados, hacen de Durán una ciudad vulnerable ante eventos climáticos extremos, como las inundaciones causadas por lluvias con una intensidad y frecuencia cada vez mayor. Como resultado, el 40% de la ciudad presenta niveles de riesgo altos ante la amenaza de inundaciones (ver Figura 1.2.), con una estimación de 76 mil habitantes en situación de riesgo, siendo los sectores más afectados los siguientes: El Recreo (en todas sus etapas), Héctor Cobos, 28 de agosto, 5 de junio, 288 hectáreas y Divino Niño (Proyecto RESCLIMA, 2019).

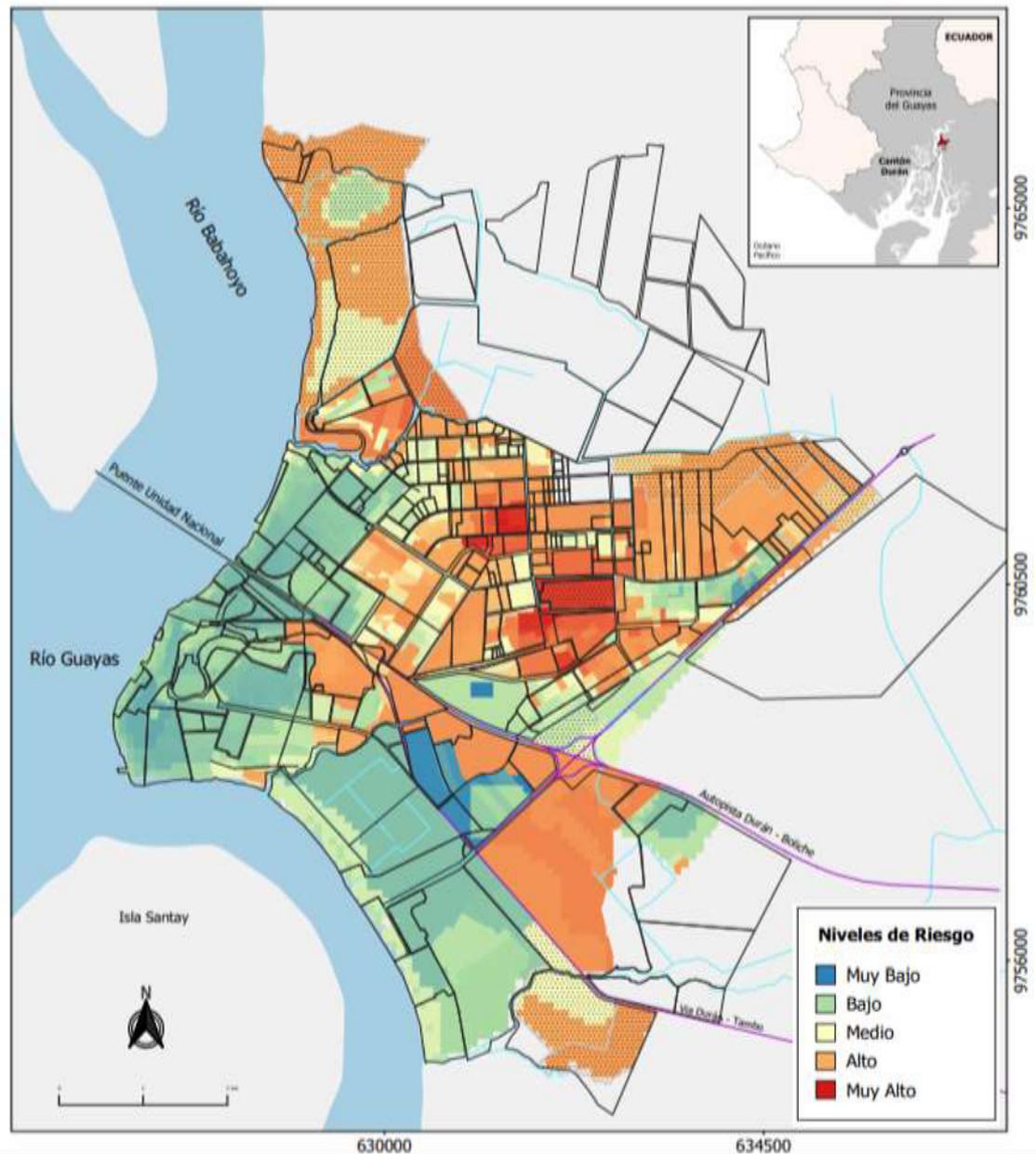


Figura 1.2. Mapa de riesgo ante inundaciones.

Fuente: Proyecto RESCLIMA. (2019).

Como un agravante a este complejo escenario, no se cuenta con información continua y confiable de la única estación meteorológica de la ciudad, ubicada en el sector Divino Niño, por lo que resulta complicado realizar proyecciones y elaborar escenarios climáticos para una eficiente planificación a largo plazo. Adicionalmente,

debido a una ineficiente gestión de desechos sólidos y la falta de conciencia de la ciudadanía, sumideros y canales de drenaje se encuentran llenos de basura. Finalmente, la red pluvial (diseñada hace más de 30 años) se encuentra en mal estado, con cotas erróneas, tuberías con diámetro insuficiente y conexión fallida a los canales (Proyecto RESCLIMA, 2019).

Bajo este panorama pueden generarse afectaciones e interrupción de servicios básicos, desencadenando un colapso del sistema urbano por fallas en la provisión de agua potable, alcantarillado sanitario y pluvial, recolección de desechos sólidos, servicio de salud y de educación, además de perjuicios al sector comercial e industrial de la ciudad, generando grandes pérdidas económicas. Se estima que, de los 250 establecimientos educativos de la ciudad, el 30% presenta niveles de riesgo altos ante la amenaza de inundaciones. Así mismo, de los 849 establecimientos comerciales de la urbe, el 16% se encuentra en situación de riesgo alta frente a las inundaciones. Finalmente, el sector industrial ubicado en la zona urbana de Durán, comprendido por 172 empresas, presenta un 30% de riesgo alto ante la amenaza de inundaciones (Proyecto RESCLIMA, 2019).

Debido a lo antes expuesto, es de imperiosa necesidad que se establezcan medidas locales, direccionadas a reducir la vulnerabilidad que presenta la ciudad e incrementar la resiliencia climática, a fin de lograr una efectiva adaptación ante eventos climáticos extremos como las inundaciones.

La infraestructura verde urbana está orientada en asemejar el ciclo hidrológico natural del sitio previo al desarrollo urbano, utilizando elementos para almacenar, infiltrar, evaporar o retener la escorrentía cerca de su punto de origen, evitando el colapso del sistema de alcantarillado pluvial (Universidad Tecnológica de Darmstadt, 2019).

La Agencia Nacional del Agua de Singapur (ABC Waters Design Guidelines, 2018), indica que la infraestructura verde urbana es considerada como multifuncional, ya que además de aportar al control de la escorrentía, su implementación ayuda a:

- Tratamiento de aguas residuales (mediante la filtración de sedimentos y absorción de contaminantes).
- Restauración de ecosistemas.
- Belleza paisajística.
- Conservación de biodiversidad.
- Provisión de servicios ecosistémicos.
- Incremento de áreas verdes y de recreación.
- Mejoramiento de la calidad del aire y clima local.
- Incremento del bienestar poblacional.
- Mejoramiento de la salud de las personas.
- Empoderamiento del espacio público e integración comunitaria.

La Sección de Ingeniería Ecología de la Universidad Tecnológica de Darmstadt (Infraestructuras verdes para la resiliencia urbana, 2019) establece que existen diferentes tipos de infraestructura verde para control de inundaciones y su implementación depende de las características específicas del área a intervenir, de tal manera que la infraestructura seleccionada sea lo más eficiente posible al momento de retener la escorrentía. En la Tabla 1.1 se destacan los distintos tipos de infraestructura verde:

Tabla 1.1. Tipos de infraestructura verde para control de inundaciones.

Infraestructura verde	Características
Techos verdes	Estructura instalada parcial o totalmente sobre techos de edificaciones, plantada en una membrana impermeabilizante, sobre la cual crece la vegetación.
Cosechas de agua	Estructura (parecida a una cisterna) utilizada para la recolección, almacenamiento y tratamiento de aguas pluviales de tejados, terrazas, patios y otras superficies impermeables.
Pavimento permeable	Tipo de pavimento con una alta porosidad que permite que el agua lluvia se infiltre hacia el subsuelo. Utilizada en zonas de poco tráfico y transitadas por vehículos ligeros.
Estanques de detención	Estructura diseñada para retener por un periodo de tiempo determinado la escorrentía de las aguas pluviales, para luego ser liberada lentamente al alcantarillado pluvial o cuerpo de agua cercano.
Lagunas de retención	Estructura con presencia permanente de agua (parecida a una piscina), diseñada para retener la escorrentía de las aguas pluviales. Se implementación permite el desarrollo de micro habitas y trae beneficios recreativos.
Estanques de infiltración	Depresión vegetada, ubicada en campos abiertos, que recibe y almacena el agua lluvia, formando un estanque poco profundo. El agua lluvia es gestionada por evaporación o infiltración.
Filtros de arena/sistemas de infiltración	Estructura que funciona de manera similar a los sistemas de retención, con la excepción de que no tienen vegetación creciendo en su superficie, debido a que se instalan bajo tierra o el medio filtrante no retiene suficiente humedad.
Zanjas de infiltración	Estructura utilizada para trasportar agua lluvia en lugar de las tuberías, por medio de pendientes suaves y vegetación que promueve una distribución uniforme y una desaceleración de los flujos.
Franjas de infiltración	Estructura poco profunda, llena de material poroso como escombros y piedras, la cual recoge la escorrentía pluvial para infiltrarla en el suelo circundante.

Fuente: Adaptación de Universidad Tecnológica de Darmstadt. (2019).

El uso de infraestructura verde urbana, como mecanismo de control y gestión del agua lluvia es relativamente nuevo. Uno de los ejemplos más importantes y de mayor éxito a nivel internacional es el caso de Singapur, que mediante el programa ABC Waters (Active, Beautiful, Clean Waters), implementado en el año 2006 y ejecutado por la Agencia Nacional del Agua de Singapur, se han desarrollado 8,000 km de vías fluviales y embalses, mediante la integración y rediseño de canales, desagües, ríos y embalses con el entorno circundante, más allá de sus funciones tradicionales, generando espacios de recreación para las personas. Este programa fue implementado con el objetivo de transformar la ciudad de Singapur en una urbe de jardines y agua, desarrollando el entorno urbano alrededor del agua y acercando a las personas al recurso hídrico (Agencia Nacional del Agua de Singapur, 2016).

Otro caso exitoso es el de la ciudad de Melbourne, que por medio de Melbourne Water administra y protege los recursos hídricos de la ciudad, siendo responsable del suministro de agua potable, tratamiento de aguas residuales, administración de vías fluviales y gestión de sistemas de drenaje e inundaciones. En el año 2005 Melbourne Water publicó el Manual de Procedimientos de Ingeniería de Diseño Urbano Sensibles al Agua, con el propósito de incorporar tecnologías de diseño urbano sensibles al agua en los proyectos de desarrollo urbano, brindar asesoramiento sobre los detalles de diseño de los elementos urbanos sensibles al agua y que los diseños satisfagan los requisitos de ingeniería de un sistema de aguas pluviales (Melbourne Water, 2005).

See Urban Water o Visión Urbana del Agua, es un proyecto multidisciplinario liderado por la Universidad Técnica de Darmstadt y financiado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania, con una duración de cinco años (2018-2022), desarrollado en el contexto de la gestión de aguas pluviales, el tratamiento de aguas residuales y la restauración de ríos urbanos en cuencas y áreas urbanas en Nicaragua (Río Pochote, León) y Costa Rica (Quebrada Seca-Río Burío, Heredia). El proyecto tiene los siguientes objetivos principales: Diseñar e implementar

obras piloto de infraestructura verde; Evaluar y optimizar su funcionamiento en términos ecológicos y socioeconómicos; y establecer buenas prácticas de diseño, implementación y replicación (Proyecto See Urban Water, 2019).

A nivel nacional son pocas las iniciativas de implementación de infraestructura verde urbana para control de inundaciones, una de ellas es Guayaquil Cielo Florido, la cual nació de un convenio de cooperación interinstitucional entre la Fundación Ecológica Proyecta Verde y la M. I. Municipalidad de Guayaquil, con el objetivo de elaborar un guía para la instalación de techos y fachadas verdes (aplicada a la ciudad de Guayaquil) y una Ordenanza Municipal que incentive la construcción de edificaciones sostenibles. Como resultado del proyecto, el 9 de mayo del 2019 fue aprobada por el Concejo Cantonal de Guayaquil la respectiva Ordenanza y el 24 de octubre del 2019 fue presentada de manera oficial la Guía de Instalación de Techos, Paredes y Fachadas Verdes “Guayaquil Cielo Florido”. Sin embargo, hasta la presente fecha no se han implementado tanto la Ordenanza como la Guía. (Fundación Ecológica Proyecta Verde, 2019).

En base a lo antes expuesto, ¿La implementación de infraestructura verde urbana es una alternativa viable para mitigar el impacto de las inundaciones en la ciudad de Durán?

De acuerdo a lo establecido en los párrafos anteriores, los objetivos planteados guardan relación con el hecho de que la implementación de infraestructura verde urbana puede mejorar gestión sobre la escorrentía, lo cual contribuye a reducir las inundaciones. Se pretende determinar si es una alternativa viable, para mitigar el impacto de las inundaciones en el Cantón Durán. Por lo cual el objetivo general y los objetivos específicos son:

I.1. Objetivo General. -

Simular y evaluar el desenvolvimiento de la infraestructura verde urbana, respecto a la capacidad de control de escorrentía, a fin de comparar su efectividad con el sistema de alcantarillado pluvial actual, en un sector específico del Cantón Durán.

I. 1.1. Objetivos Específicos. -

- Seleccionar el sector de estudio sobre el cual se va a desarrollar la simulación de implementación de infraestructura verde urbana, en base a parámetros predeterminados.
- Establecer el tipo de infraestructura verde urbana a ser implementada, de acuerdo con las características propias del sector seleccionado.
- Modelar y comparar, mediante el uso de la herramienta Storm Water Management Model (SWMM), la gestión de la escorrentía, tanto del sistema actual de alcantarillado pluvial, como de la implementación de infraestructura verde urbana.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1. Antecedentes.

Tradicionalmente, la gestión de las aguas pluviales se ha desarrollado bajo el enfoque de captura, transporte y descarga a los cuerpos receptores los más rápido posible, con el objetivo de evitar inundaciones locales y proteger la infraestructura urbana. Sin embargo, debido al crecimiento exponencial de las ciudades, las cuales albergan en la actualidad al 55% de la población mundial (Banco Mundial, 2019), la gestión tradicional de las aguas pluviales se ha vuelto un problema, ya que la urbanización altera las condiciones naturales fluviales que tenía una zona antes del desarrollo urbano, debido al crecimiento del área impermeable, lo cual aumenta la escorrentía y al mismo tiempo reduce la infiltración, en consecuencia se produce una reducción en la recarga del agua subterránea, disminuye la evapotranspiración y la descarga en los cuerpos receptores es mayor y más pronunciada (Universidad Tecnológica de Darmstadt, 2019).

Como se ilustra en la Figura 2.1., en condiciones naturales las aguas pluviales se infiltran en un 50%, se evaporan en un 40% y el 10% restante se mantiene en la superficie del suelo como escorrentía; sin embargo, en áreas altamente urbanizadas solo un 15% de las aguas pluviales se infiltra, el 30% se evapora y el 55% se mantiene en la superficie del suelo como escorrentía. Este exceso de escorrentía genera el colapso de los sistemas de alcantarillado pluvial, causando inundaciones en las ciudades. (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 1998).

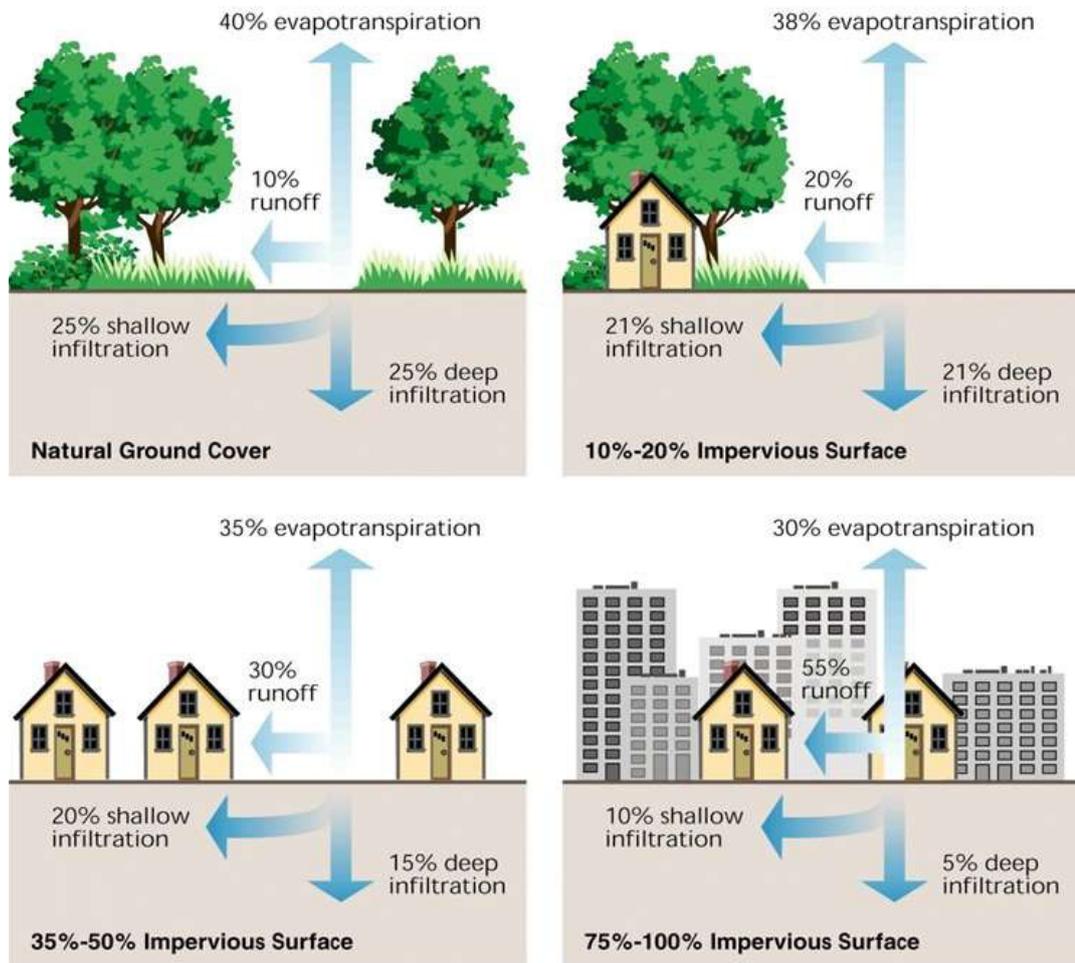


Figura 2.1. Impacto de la urbanización sobre la ecología fluvial.

Fuente: USDA. (1998).

Debido a lo antes expuesto, las ciudades son cada vez más vulnerables ante la amenaza de las inundaciones, puesto que según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014), los eventos extremos de precipitaciones son cada vez más frecuentes y con mayor intensidad, poniendo en riesgo sistemas urbanos enteros.

Ante esta situación, fue necesario un cambio de enfoque sobre la gestión de las aguas pluviales, que vaya más allá del simple transporte de agua por medio de tuberías o infraestructura gris, hacia la implementación de infraestructura verde urbana, la cual fue concebida para imitar los procesos hidrológicos naturales, puesto que su función es la de almacenar, retener, transportar, infiltrar y evaporar la escorrentía producto de las aguas pluviales; permitiendo reducir las inundaciones, mitigar la contaminación y mejorar el paisaje urbano (Universidad Tecnológica de Darmstadt, 2019).

II.2. Tipos de espacios verdes urbanos.

Inicialmente, el concepto de infraestructura verde se centraba únicamente en la conservación y mantenimiento de ecosistemas naturales, mediante una red de espacios interconectados; no obstante, con el tiempo fue evolucionando, manteniendo el término aliado de “interconexión”, pero incluyendo no solo sitios naturales, sino también, espacios creados que contienen especies naturales. A microescala se puede mencionar a los techos verdes, jardines verticales y plazas; mientras que, a escala de paisaje, dicha infraestructura corresponde a humedales, bosques, parques intercomunales, corredores ribereños y líneas de costa (Vásquez, 2016).

Vásquez (2016) señala que la infraestructura verde admira varias escalas espaciales de intervención, tales como regional/comarcal (la más amplia), ciudad/metropolitana/ y barrio/comunidad (más reducida). La escala regional y comarcal integra los espacios con mayor valor ambiental, paisajístico y patrimonial, así como las conexiones necesarias para mantener los procesos ecológicos básicos del territorio. Así mismo, la escala ciudad y/o metropolitana es aquella que concibe los elementos urbanos con potencialidad ecológica como setos, muros de piedra, bosques de galería, árboles aislados, cultivos, entre otros. Y, finalmente, la escala de barrio/comunidad se apoya tanto en elementos naturales como seminaturales y artificiales, sobre los cuales resulta posible actuar en los índices bióticos del suelo y la biocapacidad urbana (Centro de Estudios Ambientales del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2014).

Vásquez (2016) propone (ver Tabla 2.1.) como ejemplos los siguientes componentes del paisaje que poseen potencial funcionalidad como infraestructura verde:

Tabla 2.1. Potenciales espacios funcionales como infraestructura verde urbana.

Macro escala	Escala intermedia	Microescala
Regional/Comarcal	Ciudad/Metropolitana	Barrio/Comunidad
Todos los elementos constituyentes de áreas protegidas.	Ríos y llanuras de inundación	Calles arboladas
Bordes costeros y playas	Parques intercomunales	Techos y paredes verdes
Senderos estratégicos de larga distancia	Canales urbanos	Jardines privados
Bosques	Lagunas	Estanques y arroyos
Fajas de resguardo en líneas de alta tensión	Bosques urbanos	Peatonales y ciclo rutas
Red de carreteras y ferrocarriles	Parques naturales	Quebradas
Cinturón verde designado	Plazas municipales	Patios de escuela
Ríos y llanuras de inundación	Frentes de agua	Huertos
Canales	Cerros	Terrenos baldíos
Campo abierto	Esteros	Zanjas de inundación
Cordones montañosos	Terrenos abandonados	Cementerios
Fallas geológicas		
Lagos		

Fuente: Adaptación del texto de Vásquez, A. (2016).

Las áreas verdes, entendidas como espacios públicos, ofertan múltiples beneficios a los tejidos urbanos gracias a la interacción entre el entorno natural y las viviendas aledañas (Cantó, 2014). Ante ello, Lluísupa & Zhagüi (2016) establecen los siguientes seis tipos de áreas verdes:

- Parques lineales: espacios que contienen elementos lineales, planeados, diseñados y manejados con múltiples objetivos orientados a la ecología, recreación, cultural y estético.
- Parques infantiles: áreas de recreación para niños y adolescentes; adicionalmente, es capaz de incluir zonas de ocio y contemplación para el público adulto.
- Parques barriales: zonas de recreación para la población concentrada en barrios.
- Parque urbano: espacios de recreación para el público en general.
- Plazas y plazoletas: espacios al aire libre, rodeados de edificaciones, en donde, principalmente, incurren actividades socioculturales.
- Parque regional: espacios de gran dimensión con altos valores ambientales, los cuales ofrecen, además, actividades de recreación.

II.3. Servicios ecosistémicos obtenidos de la implementación de infraestructura verde urbana.

Los servicios ecosistémicos se definen como los beneficios que la sociedad obtiene de las funciones de los ecosistemas, en otras palabras, la contribución del ecosistema al bienestar humano (FAO, 2020). Calaza (2019) estipula que los servicios ecosistémicos cuantifican flujos potenciales y actuales. El potencial mide la cantidad de servicio que puede ser proporcionado o utilizado de forma sostenible en una región determinada, considerando el uso actual de la tierra y las propiedades y condiciones del ecosistema. Entre tanto, el flujo actual, más bien, define las condiciones de uso sostenible en cuanto a su demanda.

De acuerdo con Vásquez (2016), los servicios ecosistémicos se clasifican en tres grupos: servicios de regulación, de provisión y culturales (ver Tabla 2.2.). Los servicios de regulación responden a la moderación o mediación de los seres vivos en el entorno ambiental y su afectación en las actividades y bienestar humano. Por otro lado, los servicios de provisión se refieren a los productos de alimentación, suministro de materiales y fuentes de energía que son dotadas a los sistemas vivos; es decir, aquellos productos que se obtienen de los ecosistemas. Y, finalmente, se consideran servicios culturales a todos aquellos aspectos del ecosistema que tienen incidencia sobre el estado físico y mental de las personas.

Tabla 2.2. Resumen de los servicios ecosistémicos.

Servicios de regulación	Servicios de provisión	Servicios culturales
Regulación climatológica	Cultivos	Recreación, turismo y ecoturismo
Regulación de la calidad del aire (reducción de la contaminación)	Forraje	Belleza escénica
Infiltración y drenaje de aguas	Fibra	Experiencia espiritual y religiosa
Purificación del agua	Madera/Leña	Patrimonio de la diversidad cultural
Regulación de la erosión	Ganado	Patrimonio de la diversidad natural
Control de plagas y enfermedades	Mineralogía	Valor educativo
Descomposición de orgánicos	Alimentos y vegetación	Integración social
Reducción de ruido	Acuicultura	Salud mental y física de las personas
Regulación de gases (oxígeno y dióxido de carbono)	Recursos energéticos abióticos	
Secuestro de carbono	Recursos genéticos	

Fuente: Adaptación de Vásquez, A. (2016).

II.4. Componentes del sistema de infraestructura verde.

El Centro de Estudios Ambientales (CEA) del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz (2014) indica que la actual dinámica de desarrollo urbano conforma un Sistema de Infraestructura Verde Urbana, definido como el lazo entre los parques y espacios verdes en las zonas urbanas para el beneficio de los seres humanos y en la inquietud de contrarrestar la fragmentación de los hábitáculos, mediante la conexión de estos con áreas naturales, a la par del cumplimiento con las funciones descritas en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Funciones de la infraestructura verde.

Fuente: Valdés & Foulkes. (2016).

La infraestructura verde se halla conformado por los siguientes componentes: 1) gestión sostenible del agua, 2) movilidad urbana sostenible, 3) renovación y rehabilitación de espacios públicos y edificios, y 4) diseño y gestión del verde urbano (Del Pozo, 2016).

Dentro de la gestión del agua se maneja la transformación de los sistemas convencionales de tratamiento de agua pluviales en sistemas urbanos de drenaje sostenible, que coadyuven con la reducción de carga de aguas pluviales en el alcantarillado; cuyos posibles proyectos pueden ser: jardines de lluvia (filtros de agua de escorrentía), depósitos de infiltración (zonas de embalse superficial para almacenar agua temporalmente), y sistemas de recogida de aguas pluviales (Calaza, 2019; Del Pozo, 2016).

El segundo componente, movilidad urbana sostenible, vislumbra la reconversión de infraestructura móvil en corredores verdes asociados a ejes de movilidad peatonal; tales como: corredores verdes y espacios comunitarios, reutilización de infraestructuras lineales (Vásquez, 2016; Calaza, 2019).

Así mismo, en el tercer componente, renovación y rehabilitación de espacios públicos, el objetivo es integrar espacios de juegos y biodiversidad en áreas reducidas. Su implantación puede darse en cementerios (aprovechamiento del recurso suelo), huertos urbanos (aprendizaje y producción de alimentos de proximidad), fachada vegetal (favorece aislamiento térmico), y espacios verdes comunitarios (producción de alimentos locales en cubiertas de edificios) (Gil et al, 2017).

Por último, en el diseño y gestión del verde urbano se entraña la recuperación de los ecosistemas fluviales urbanos con diseños que favorezcan el acercamiento al agua. Ejemplos de este componente son la generación de hábitats para insectos, pequeñas aves y polinizadores; jardines verticales (incrementan superficie de espacio verde) y microespacios de biodiversidad (Gil et al, 2017).

II.5. Infraestructura verde como mecanismo de gestión del agua: riesgo de inundación.

Núñez (2019) afirma que la implantación de una infraestructura verde coadyuvará a la mitigación y adaptación a los impactos del cambio climático, reducción de inundaciones y regulación de caudales, provisión de agua y control de contaminantes, incrementar resiliencia de los ecosistemas, aumento de la conciencia ambiental de la sociedad.

Uno de los elementos incluyentes de la infraestructura verde es la gestión del agua, razón por la cual surgió la denominación de “infraestructura azul” que, según Hans (2016) y Rodríguez (2019) comprenden la rehabilitación y restauración de ríos, quebradas, humedales integrados a las ciudades, terrazas o suelos porosos para la captación de aguas, jardines que captan aguas lluvias y las infiltran. Entre tanto, también aparece el término infraestructura verde-azul que, por su parte, pretende imitar el ciclo de agua y mejorar la capacidad de una ciudad para redirigir, absorber y reutilizar el agua de las inundaciones, reduciendo consigo el riesgo por esta estocástica eventualidad.

Dicho esto, una infraestructura verde-azul o blue-green infrastructure, por sus siglas en inglés, se define como redes interconectadas planificadas de áreas naturales y seminaturales, los cuales incluyen cuerpos de agua, espacios verdes abiertos, que proveen de diferentes servicios ecosistémicos (Fundación Humedales, 2019; Dreiseitl, 2013).

La Fundación Humedales (2019) señala que, en las ciudades densamente pobladas, los asentamientos se hallan sobre llanuras de inundación de los ríos, es decir, son áreas inundables y por tanto representan zonas vulnerables de un desastre natural. Con una infraestructura gris se diseñaría la canalización del río para proteger sus márgenes, no obstante, el agua descargaría más rápido y con mayor probabilidad de incrementar el riesgo de inundación de la cuenca baja. Entre tanto, en una

infraestructura verde-azul las planicies de inundación se llenarían, extendiéndose y retardando el escurrimiento y disminuyan la velocidad del cauce, controlando, colateralmente, la erosión. En otras palabras, en lugar de confinar el río, se le da espacio para crecer y decrecer de acuerdo con su dinámica natural.

II.6. Objetivos de una infraestructura verde-azul.

Por infraestructura verde-azul, se refiere al uso de vegetación, suelos y procesos naturales en un contexto urbano para entregar simultáneamente beneficios de gestión del paisaje y el agua. Puede ayudar a resolver los desafíos urbanos y climáticos a través de la provisión de servicios ecosistémicos que mejoren el bienestar y la prosperidad de las comunidades locales (Victoria State Government, 2017). La infraestructura verde-azul presenta 10 objetivos fundamentales, los cuales garantizan que las ciudades sean saludables, prósperas y resistentes; que se enlista a continuación en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Objetivos fundamentales de una infraestructura verde-azul.

Nro.	Objetivos Fundamentales
1	Apoyar la recreación pasiva y activa.
2	Proteger y mejorar las vías fluviales locales y ambientes acuáticos.
3	Apoyar la biodiversidad urbana.
4	Mejorar la amenidad del ambiente urbano.
5	Crear conexiones más fuertes entre las comunidades y la naturaleza.
6	Mejorar la funcionalidad de los lugares urbanos.
7	Impulsar un mayor turismo.
8	Hacer uso de suministros de agua alternativos localmente para prepararse para la sequía.
9	Reducir el impacto de las inundaciones.
10	Proporcionar ambientes agradables y refrescantes durante el clima cálido.

Fuente: Adaptación de Victoria State Government. (2017).

Eguia & Baxendale (2019) expresan que un enfoque sólido de infraestructura verde integra cuatro principios básicos:

- Integración verde-azul-gris: coordinación de espacios verdes urbanos, periurbanos y rurales, cuerpos de agua y demás estructuras de la urbe.
- Conectividad: creación de redes de espacios verdes.
- Multifuncionalidad: combinar, potenciar y mejorar múltiples funciones y servicios que favorezcan la capacidad del área verde urbana.
- Inclusión social: incorporación de procesos de planificación participativa socialmente inclusivos, que favorezcan la confianza y fiabilidad de información.

II.7. Elementos de una infraestructura verde-azul.

La infraestructura verde-azul se puede presentar una variedad de escalas, desde iniciativas de escala locales (edificios) hasta escalas regionales (ciudades). Independientemente de la escala, estos sistemas generalmente tendrán las siguientes características en común (Victoria State Government, 2017):

- Vegetación, la cual proporciona comodidad y hábitat.
- Suelo, de volumen y contenido adecuado, drenaje de nutrientes.
- Enlace al agua de lluvia o suministro de agua reciclaje, con una frecuencia tal que logre apoyar a la vegetación y salud del suelo.

Además, pueden proporcionar funciones adicionales de gestión del agua como:

- Tratamiento del agua, mediante la filtración de suministros de agua locales y reduciendo el nivel de contaminantes que ingresan a los cuerpos de agua locales.
- Almacenamiento del agua, por medio del uso volúmenes dentro de suelos o espacio sobre el suelo para proporcionar la retención de aguas pluviales.

II.8. Tipologías aplicables en las zonas urbanas.

La Tabla 2.4 detalla los tipos de infraestructura verde-azul empleadas para reducir el riesgo de inundaciones en una urbe:

Tabla 2.4. Tipos de infraestructura verde-azul.

Infraestructura verde-azul	Explicación
Paredes verdes (Integradas a infraestructura gris)	También conocidos como jardines verticales. Usualmente se colocan en un lateral del edificio, que comprende la vegetación plantada en el suelo que une a una pared.
Raingardens (Integradas a infraestructura azul)	Son las jardineras que están diseñadas para capturar, detener y tratar la escorrentía de aguas pluviales antes de su descarga a la base del sistema, ya sea en suelos o red local de aguas pluviales.
Swales (Integradas a infraestructura azul)	Son canales pocos profundos, con vegetación, que tratan las aguas pluviales.
Bosques (Escala urbana regional)	Grandes extensiones de plantaciones densas de árboles, arbustos y plantas de cobertura. En las ciudades, los bosques pueden ser remanentes, revegetados o de recrecimiento, o bosques de nueva creación.
Cauces de agua (Escala urbana regional)	Canales que captan y transmiten flujos de cuencas, los cuales incluyen los arroyos, ríos, riachuelos, naturales o modificados.
Estanques y lagos (Integradas al espacio público)	Cuerpos de agua diseñados para mantener permanentemente el agua, empleados en mayor medida en el ámbito estético. Dicho mantenimiento se da mediante un suministro de agua de lluvia o agua reciclada.
Corredores verdes (Escala urbana regional)	Espacios verdes lineales que proporcionan servicios de conectividades entre el hábitat natural y las vías recreativas.

Tabla 2.4. Tipos de infraestructura verde-azul (continuación).

Infraestructura verde-azul	Explicación
Agricultura urbana (Escala urbana regional)	Se reconoce como la producción local de productos alimenticios, la cual puede incluir jardines de la comunidad abiertos a granjas urbanas públicas o comercialmente viables en pequeña escala.
Campos de deporte (Integradas al espacio público)	Grandes espacios abiertos que incursionan en las actividades recreativas activas. Éstos pueden ser irrigados con un suministro de agua alterno o diseñado para la detención de aguas pluviales y de infiltración
Árboles en las calles (Integradas a infraestructura gris)	Implica el crecimiento de árboles por debajo de las áreas, cuyo diseño orienta a la captación de agua de escorrentía derivado de las aceras y carreteras, o para la canalización de las aguas pluviales en zonas subterráneas del suelo.
Muros / Techos verdes (Integradas a infraestructura gris)	Pueden ser techos parciales o de total cobertura, en los cuales se planta un cultivo sobre una membrana impermeable. El agua que se colecte puede utilizarse para el riego.
Jardines (Integradas a infraestructura gris)	Comprenden vegetación plantada en un medio de crecimiento (suelos). Las aguas pluviales pueden dirigirse en jardines a través del riego pasivo o un sistema de riego activo, alimentado por fuentes de agua alternativa.
Parques (Integradas al espacio público)	La irrigación de los parques puede darse utilizando un suministro de agua alternativo o, en su defecto, el diseño de estos, estar orientados a la detención de aguas pluviales e infiltración.

Fuente: Adaptación de Victoria State Government. (2017).

II.9. Modelación de escorrentía para implementación de infraestructura verde urbana.

Los modelos informáticos se han convertido en una herramienta muy útil para la planificación y diseño de sistemas de gestión de aguas pluviales urbanas, puesto que permiten probar diferentes alternativas de gestión y evaluar su desempeño, a fin de tomar la mejor decisión, previo a su implementación en campo. Actualmente, existen varios programas que permiten simular el desenvolvimiento de sistemas de gestión de aguas pluviales urbanas, tal como se presentan en la Tabla 2.6., de los cuales según autores como Rangari et al (2015), Zoppou (2001), Elliott & Trowsdale (2007), Jayasooriya (2014), Shrivastava (2016) y Kaykhosravi et al (2018) concluyeron que el programa Storm Water Management Model (SWMM) es la herramienta más sofisticada para simular la cantidad y calidad de aguas pluviales urbanas que se puede utilizar para cualquier región geográfica, además de ser un programa de uso libre.

Tabla 2.5. Modelos para simular sistemas de gestión de aguas pluviales urbanas.

Modelo	Desarrollador	Acceso libre
SWMM	US EPA	Si
MUSIC	Universidad de Monash	No
MOUSE	DHI Water and Environment	No
P8-UCM	William W. Walker Jr	Si
PURRS	Universidad de Newcastle	No
SLAMM	Universidad de Alabama	No
STORMTAC	SWECO VIAK	No
LIDRA	Franco Montalto	Si
RECARGA	Universidad de Wisconsin	Si

II.10. Programa Storm Water Management Model (SWMM).

El SWMM es un programa de escritorio basado en Windows, con software público de código abierto y de uso gratuito en todo el mundo. Fue desarrollado en 1971 por la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos, con el objetivo de facilitar el análisis, diseño y planificación de sistemas de gestión de escorrentía de aguas pluviales, de tal forma que les permita a los tomadores de decisiones implementar medidas que logren reducir la escorrentía a través de la infiltración y la retención, así como las descargas que causan el deterioro de los cuerpos de agua. Este modelo permite simular la generación y transporte de escorrentía de aguas pluviales, tanto en calidad como cantidad, ya sea para un evento de precipitación o de largo plazo, aplicado principalmente en zonas urbanas (Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos, 2020).

El SWMM permite editar los datos de entrada del sector de estudio, correr simulaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua, así como presentar los resultados en diferentes de formatos, tales como: mapas de sistemas de transporte y áreas de drenaje codificados por colores, gráficos y tablas de series de tiempo, diagramas de perfiles y análisis estadísticos de frecuencia (Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos, 2020).

El SWMM tiene la capacidad de simular diferentes procesos hidrológicos que generan escorrentía de áreas urbanas, tales como:

- Reducción de la escorrentía mediante prácticas de infraestructura verde.
- Lluvia variable en el tiempo (precipitación) y evaporación del agua superficial estancada.
- Acumulación y derretimiento de nieve.
- Intercepción de lluvia procedente del almacenamiento de la depresión.
- Infiltración de lluvia en capas de suelo insaturado.
- Percolación de agua infiltrada en capas de agua subterránea.

- Inter flujo entre el agua subterránea y el sistema de drenaje.
- Enrutamiento de depósito no lineal de flujo terrestre.

Las aplicaciones principales del SWMM son las siguientes:

- Diseño y dimensionamiento de componentes de sistemas de drenaje para control de inundaciones.
- Dimensionamiento de las instalaciones de detención y sus accesorios para el control de inundaciones y la protección de la calidad del agua.
- Mapeo de las llanuras aluviales de los sistemas de canales naturales.
- Diseñar estrategias de control para minimizar los desbordes combinados de alcantarillado.
- Evaluar el impacto de la afluencia e infiltración en desbordes de alcantarillado sanitario.
- Generación de cargas contaminantes de fuentes difusas para la asignación de cargas de residuos.
- Controlar la escorrentía del sitio utilizando prácticas de infraestructura verde como controles de LID o Low Impact Development.
- Evaluar la efectividad de las mejores prácticas de manejo y desarrollo de bajo impacto para reducir las cargas contaminantes del clima húmedo.

El SWMM presenta la función LID, la cual permite representar la implementación de combinaciones de diferentes infraestructuras verdes, con el objetivo de determinar su efectividad en la gestión de la escorrentía. El concepto LID (utilizado ampliamente en Estados Unidos y Canadá) se enfoca en la gestión de la escorrentía como parte de la infraestructura verde, mediante la implementación de diseños de ingeniería que replican la hidrología de un sector previo al desarrollo urbano. Los tipos de infraestructuras verdes que el SWMM con la función LID puede analizar son: celdas de bioretención, jardines de lluvia, techos verdes, trincheras de

infiltración, pavimentos permeables, barriles de lluvia, desconexiones de techos y surcos vegetativos (Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos, 2020).

Debido a su versatilidad y accesibilidad, el programa SWMM ha sido usado ampliamente por investigadores alrededor del mundo, a fin de evaluar la implementación de distintos tipos infraestructura verde, en distintas locaciones y bajo diferentes escenarios. A continuación, una breve recopilación de resultados obtenidos en artículos científicos publicados en revistas indexadas, sobre modelación de infraestructura verde, haciendo uso del programa SWMM:

Qin, Li & Fu (2013), en su investigación “The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics”, realizaron una modelación de celdas de bio-retención y pavimento permeable en el Distrito de Shenzhen, sureste de China, obteniendo una reducción del volumen de inundación de hasta 14.4% para celdas de bio-retención y hasta 20.1% para pavimentos permeables.

Zahmatkesh, et al (2015), en su investigación “Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: Case Study of New York City”, probaron el rendimiento de barriles de lluvia, pavimento permeable y celdas de bio-retención en la ciudad de Nueva York, Estados Unidos. Se obtuvieron porcentajes de reducción del volumen de inundación para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años en 28%, 22%, 19%, 18% y 14% respectivamente.

Jia, et al (2015), en su investigación “Field monitoring of a LID-BMP treatment train system in China”, ejecutaron una modelación con celdas de bio-retención y surcos vegetativos en Guangdong, China. Como resultado se obtuvo una reducción del 62% en el volumen de inundación al implementar celdas de bio-retención y 32% al implementar surcos vegetativos.

Eckart, McPhee & Bolisetti (2018), en su investigación “Multi-objective optimization of low impact development storm water controls”, modelaron la implementación de barriles de lluvia, pavimento permeable, celdas de bio-retención, jardines de lluvia y trincheras de infiltración. El lugar de estudio fue en Windsor, Ontario, Canadá. Se obtuvo como resultado una reducción del volumen de inundación de hasta el 29%.

Bae & Lee (2019), en su trabajo de investigación “Effects of low-impact development practices for flood events at the catchment scale in a highly developed urban area”, ejecutaron una modelación con techos verdes y pavimentos permeables en la ciudad de Seúl, Corea del Sur. Como resultado se obtuvo una reducción del volumen de inundación de hasta el 54%.

Hamed Ghodsi, et al (2019), en su trabajo de investigación “Optimal design of low impact development practices in response to climate change”, probaron el rendimiento de celdas de bio-retención, pavimento permeable, surcos vegetativos y trincheras de infiltración. El lugar de estudio fue la cuenca hidrográfica de Velenjak, en la parte noreste de Teherán, Irán. Se obtuvo hasta un 14% de reducción del volumen de inundación.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

III.1. Región de Estudio.

Para el presente trabajo se seleccionó a la ciudad de Durán, debido a que, por una combinación de diversos factores, tanto naturales como antrópicos, es una urbe vulnerable ante eventos climáticos extremos como las inundaciones (explicado detalladamente en la Sección I). Entre los factores más importantes se encuentra los siguientes:

- Acelerado crecimiento poblacional.
- Falta de planificación urbana.
- 50% del área urbana comprendida por asentamientos irregulares.
- 25% de la población con acceso al servicio de alcantarillado pluvial y alcantarillado sanitario.
- 40% de la población con acceso al servicio de agua potable por tubería.
- Urbe asentada sobre un ecosistema estuarino, es decir una zona inundable.
- Sectores de la ciudad presentan cotas por debajo del nivel de los ríos circundantes.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el Proyecto RESCLIMA (2019), el 40% de la ciudad presenta niveles de riesgo altos ante la amenaza de inundaciones, con una estimación de 76 mil habitantes en situación de riesgo, siendo los sectores más afectados los siguientes: El Recreo (en todas sus etapas), Héctor Cobos, 28 de agosto, 5 de junio, 288 hectáreas y Divino Niño (ver Figura 1.2).

III.2. Paso 1: Selección del sector de estudio.

Este paso se encuentra concatenado con el primer objetivo específico del presente trabajo, mismo que plantea definir el lugar específico en el cual se desarrollará el estudio, para lo cual se hace una revisión profunda para garantizar que el lugar seleccionado cumpla con los siguientes criterios:

- Red de alcantarillado pluvial: el sector de estudio debe contar con red de alcantarillado pluvial, puesto que la infraestructura verde urbana fue concebida con el fin de mejorar el desenvolvimiento de las redes pluviales, mediante la retención de la escorrentía.
- Asentamiento consolidado: el sector de estudio debe evidenciar desarrollo urbano, es decir, el sector debe contar con calles asfaltadas y aceras construidas, lo cual se traduce en suelo impermeabilizado y escorrentía superficial.
- Riesgo de inundación: el sector de estudio debe presentar riesgo de inundación muy alto, de acuerdo con la categorización del riesgo establecida en el Proyecto RESCLIMA, de tal manera que se pueda evaluar el desempeño de la infraestructura verde urbana en los sectores más críticos.
- Uso de suelo: el uso de suelo del área de estudio debe ser residencial, ya que la implementación de infraestructura verde urbana es más factible en zonas residenciales, debido a la disponibilidad de espacio (como se explicó en el punto anterior), además los servicios ecosistemas que brindan tienen una mejor percepción ciudadana en dichos sectores, a diferencia de zonas comerciales o industriales. Inclusive estas infraestructuras podrían entrar en conflicto con las actividades que se desarrollan en áreas comerciales o industriales, principalmente por el uso y aprovechamiento del espacio.

- Áreas verdes: el área de estudio debe contar con áreas verdes, puesto que dichos espacios pueden ser aprovechados para la implementación de infraestructura verde urbana.

Los criterios establecidos permitirán restringir los posibles sectores de la ciudad en áreas específicas que cumplan con los mismos, es decir de una lista larga a lista corta. En la Tabla 3.1., a continuación, presentada se establece la fuente de información para cada criterio:

Tabla 3.1. Criterios y fuente de información para la selección del sector de estudio.

Criterios	Fuente de información
Red de Alcantarillado Pluvial	Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Durán
Asentamiento consolidado	Dirección de Obras Públicas del Municipio de Durán
Riesgo de inundación	Dirección de Gestión de Riesgos del Municipio de Durán & Proyecto RESCLIMA
Uso de suelo	Dirección de Planeamiento Urbano del Municipio de Durán
Áreas verdes	Dirección de Mantenimiento de Espacios Públicos del Municipio de Durán

El resultado esperado del presente paso es la obtención de una lista corta de sectores que cumplan con los criterios de selección y finalmente bajo criterio de expertos cual es el sector por trabajar.

III.3. Paso 2: Selección de tipo de infraestructura verde más adecuada según las características del lugar.

Este paso se encuentra concatenado con el segundo objetivo específico del presente trabajo, mismo que plantea establecer el tipo de infraestructura verde urbana a implementar en el sector de estudio, para lo cual se utiliza la herramienta Google Earth Pro, en complemento con verificaciones in situ, a fin de definir el potencial de implementación de cada tipo de infraestructura verde, para el sector de estudio, en base a los siguientes criterios:

- Diseño de las calles: material (asfalto, hormigón, adoquín), ancho, longitud, sentido (una vía, doble vía), número de carriles, espacio para parqueo, presencia de parterre central.
- Diseño de las aceras: material (cemento, adoquín), altura, ancho, longitud.
- Espacio disponible: metros cuadrados de espacio público disponible para implementar infraestructura verde urbana.
- Presencia y tamaño de áreas verdes: número de áreas verdes y metros cuadrados de las mismas que pueden ser aprovechados para implementar infraestructura verde urbana.

El resultado esperado del presente paso es conocer las características específicas del sector de estudio, que permitan seleccionar el tipo de infraestructura verde urbana que presenta real potencial de implementación en la zona.

III.4. Paso 3: Modelar y comparar la gestión de la escorrentía.

Este paso se encuentra concatenado con el tercer objetivo específico del presente trabajo, mismo que plantea modelar y comparar el desenvolvimiento de la infraestructura verde urbana seleccionada en cuanto a la gestión de la escorrentía, con respecto al sistema actual de alcantarillado pluvial, mediante el uso de la herramienta Stormwater Management Model (SWMM), desarrollada por la USEPA.

En el presente trabajo se decidió utilizar el método del SCS (Soil Conservation Service). Este método establece que la capacidad de infiltración del suelo, a lo largo del evento de lluvia, se reduce en función de la lluvia acumulada y un valor tabulado CN (número de curva). Este valor de CN se encuentra en 0 y 100, estando los valores más bajos asociados a zonas naturales con alta capacidad de infiltración y los valores más altos para zonas mayormente urbana, con baja capacidad de infiltración. A través de este método se calcula el escurrimiento superficial como el exceso de lluvia que no logra infiltrarse en el suelo (Rossman, 2015). Para la zona de Durán se ha estimado un valor de CN de 80. Este considera que la zona está totalmente urbanizada, sin embargo, no se encuentra completamente pavimentada.

A fin de evaluar el desenvolvimiento de la infraestructura verde urbana, se ha planteado realizar dos escenarios, el escenario actual, en el cual se pretende conocer los volúmenes de inundación del sector de estudio, a partir de las características propias del sistema de alcantarillado pluvial y el “escenario verde”, en el cual se agregan las infraestructuras verdes seccionadas, de tal manera que se pueda comparar la reducción de los volúmenes de inundación respecto al escenario actual y determinar la efectividad de dichas infraestructuras.

Para la modelación del escenario actual, es necesario ingresar en el SWMM la siguiente información:

- Diseño del sistema de drenaje pluvial del sector de estudio.
- Topografía del sector de estudio
- Lluvia de diseño para el sector de estudio.

El diseño del sistema de drenaje pluvial del sector de estudio es obtenido del plano de la red de alcantarillado pluvial, proporcionado por el Municipio de Durán, en formato AutoCAD, del cual se utiliza la siguiente información:

- Ubicación de sumideros, cámaras y tuberías de aguas lluvias.
- Diámetros, longitud, material y cotas de fondo de instalación a la entrada y salida de las tuberías de aguas lluvias.

Para determinar tanto la cota de terreno de las cámaras como las áreas de aportación a cada una de estas, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) proporcionado por el Municipio de Durán. Este modelo fue obtenido por medio de topografía LIDAR, por lo que puede presentar una cierta diferencia con las cotas reales. A partir de esta información se pudo establecer las cotas de terreno de las cámaras de AALL, dato que no se encontraba disponible en el plano general de alcantarillado pluvial de Durán. Para las áreas de aportación se estableció la dirección del flujo en la superficie y en combinación con la ubicación de sumideros se pudo obtener, de manera aproximada, las áreas de aportación de cada cámara. Es importante aclarar que, al ser una zona mayormente plana y considerando que el levantamiento presenta un margen de error, puede existir una diferencia entre las áreas obtenidas para el presente trabajo y las reales. En la información antes mencionada se encontraron algunas inconsistencias, mismas que fueron corregidas en la medida de lo posible.

La lluvia de diseño para el sector de estudio es obtenida por medio de las ecuaciones pluviométricas, desarrolladas por la empresa INTERAGUA en el año 2015 para la ciudad de Guayaquil, en base a la información de la estación meteorológica del Aeropuerto de Guayaquil. Estas ecuaciones permiten establecer una relación entre la intensidad de la lluvia, la duración de la tormenta y la frecuencia del evento. Para el presente trabajo se ha planteado utilizar las ecuaciones para periodos de recurrencia de 2, 5, 10, 25 y 50 años, con lluvias de una duración de 2 horas. En la Tabla 3.3 se presentan las ecuaciones pluviométricas para cada periodo de recurrencia:

Tabla 3.2. Ecuaciones pluviométricas para cada periodo de recurrencia.

Periodo de recurrencia	Ecuación pluviométrica
2	$i = \frac{742.53}{t^{0.63} + 5.47}$
5	$i = \frac{570.75}{t^{0.5} + 2.35}$
10	$i = \frac{521}{t^{0.45} + 1.49}$
25	$i = \frac{486.47}{t^{0.4} + 0.88}$
50	$i = \frac{471.72}{t^{0.37} + 0.59}$

Fuente: Adaptación del Manual de diseño de redes de Alcantarillado elaborado por INTERAGUA (2015). Guayaquil, Ecuador.

Utilizando el método de los bloques alternos de Ven Te Chow (1994), se obtienen los hietogramas acumulados por cada periodo de recurrencia, información que es ingresada en el SWMM como lluvia de diseño. En las Tablas 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8, se presentan los hietogramas acumulados para cada periodo de recurrencia.

Tabla 3.3. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 2 años.

t	i	h	Incremento	Alternado	Acumulado
min	mm/h	mm	Mm	Mm	mm
10	76.27	12.71	12.71	2.47	2.47
20	61.51	20.50	7.79	2.78	5.26
30	53.06	26.53	6.03	3.22	8.48
40	47.34	31.56	5.02	3.88	12.35
50	43.10	35.92	4.36	5.02	17.38
60	39.79	39.79	3.88	7.79	25.17
70	37.12	43.30	3.51	12.71	37.88
80	34.89	46.52	3.22	6.03	43.91
90	33.00	49.51	2.98	4.36	48.27
100	31.37	52.29	2.78	3.51	51.78
110	29.95	54.91	2.62	2.98	54.76
120	28.69	57.38	2.47	2.62	57.38

Fuente: Adaptación del Manual de diseño de redes de Alcantarillado elaborado por INTERAGUA (2015). Guayaquil, Ecuador.

Tabla 3.4. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 5 años.

t	i	h	Incremento	Alternado	Acumulado
min	mm/h	mm	mm	Mm	mm
10	103.54	17.26	17.26	4.29	4.29
20	83.66	27.89	10.63	4.70	8.99
30	72.92	36.46	8.57	5.24	14.23
40	65.80	43.86	7.40	6.05	20.28
50	60.58	50.49	6.62	7.40	27.69
60	56.53	56.53	6.05	10.63	38.32
70	53.26	62.13	5.60	17.26	55.57
80	50.53	67.38	5.24	8.57	64.15
90	48.22	72.33	4.95	6.62	70.77
100	46.21	77.02	4.70	5.60	76.37
110	44.46	81.51	4.48	4.95	81.32
120	42.90	85.80	4.29	4.48	85.80

Fuente: Adaptación del Manual de diseño de redes de Alcantarillado elaborado por INTERAGUA (2015). Guayaquil, Ecuador.

Tabla 3.5. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 10 años.

t	i	h	Incremento	Alternado	Acumulado
min	mm/h	mm	mm	Mm	mm
10	120.93	20.15	20.15	5.39	5.39
20	97.57	32.52	12.37	5.84	11.23
30	85.26	42.63	10.11	6.45	17.69
40	77.19	51.46	8.83	7.34	25.03
50	71.32	59.44	7.97	8.83	33.86
60	66.78	66.78	7.34	12.37	46.23
70	63.11	73.63	6.85	20.15	66.38
80	60.06	80.08	6.45	10.11	76.49
90	57.47	86.21	6.12	7.97	84.46
100	55.23	92.05	5.84	6.85	91.32
110	53.26	97.65	5.60	6.12	97.44
120	51.52	103.04	5.39	5.60	103.04

Fuente: Adaptación del Manual de diseño de redes de Alcantarillado elaborado por INTERAGUA (2015). Guayaquil, Ecuador.

Tabla 3.6. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 25 años.

t	i	h	Incremento	Alternado	Acumulado
min	mm/h	mm	mm	Mm	mm
10	143.42	23.90	23.90	6.94	6.94
20	115.98	38.66	14.76	7.46	14.41
30	101.81	50.91	12.25	8.16	22.56
40	92.60	61.73	10.83	9.16	31.72
50	85.92	71.60	8.87	10.83	42.55
60	80.76	80.76	9.16	14.76	57.31
70	76.60	89.37	8.61	23.90	81.21
80	73.14	97.53	8.16	12.25	93.46
90	70.21	105.31	7.78	9.87	103.33
100	67.66	112.77	7.46	8.61	111.93
110	65.43	119.96	7.19	7.78	119.71
120	63.45	126.90	6.94	7.19	126.90

Fuente: Adaptación del Manual de diseño de redes de Alcantarillado elaborado por INTERAGUA (2015). Guayaquil, Ecuador.

Tabla 3.7. Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 50 años.

t	i	h	Incremento	Alternado	Acumulado
min	mm/h	mm	mm	Mm	mm
10	160.76	26.79	26.79	8.19	8.19
20	130.32	43.44	16.65	8.76	16.95
30	114.78	57.39	13.95	9.52	26.47
40	104.70	69.80	12.41	10.61	37.08
50	97.42	81.18	11.38	12.41	49.50
60	91.79	91.79	10.61	16.65	66.15
70	87.26	101.80	10.01	26.79	92.94
80	83.49	111.32	9.52	13.95	106.89
90	80.29	120.43	9.11	11.38	118.26
100	77.52	129.19	8.76	10.01	128.27
110	75.08	137.65	8.46	9.11	137.38
120	72.92	145.84	8.19	8.46	145.84

Fuente: Adaptación del Manual de diseño de redes de Alcantarillado elaborado por INTERAGUA (2015). Guayaquil, Ecuador.

En resumen, la estructura del modelo y su parametrización, es decir la información ingresada para establecer el escenario actual, es la siguiente:

Áreas de aportación a las cámaras de alcantarillado pluvial:

- Área de aportación.
- Porcentaje de área permeable.
- Porcentaje de área impermeable.
- Pendiente promedio del área.
- Coeficiente de rugosidad de Manning para la zona permeable.
- Coeficiente de rugosidad de Manning para la zona impermeable.

Cámaras de alcantarillado pluvial:

- Cota de fondo.
- Cota del terreno.

Tuberías:

- Material.
- Cota de entrada.
- Cota de salida.
- Longitud.
- Pendiente de instalación.

Descargas:

- Cota de fondo.
- Nivel de agua del cuerpo receptor.

Lluvia de diseño:

- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 2 años.
- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 5 años.
- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 10 años.
- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 25 años.
- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 50 años.

Una vez que los caudales del escurrimiento superficial ingresan a las cámaras de aguas lluvias, estos son transportados a través de los conductos del sistema de alcantarillado pluvial. Para estos cálculos el modelo utiliza las fórmulas de Saint Venant, por lo que permite seleccionar entre 3 modelos hidráulicos de transporte:

- Flujo uniforme.
- Onda cinemática.
- Onda dinámica.

En este caso se trabajó con la onda dinámica. Este modelo permite, entre otras cosas, representar flujo presurizado. Es decir que el conducto puede trabajar con caudales mayores al caudal obtenido con la ecuación de Manning para tubo lleno. La inundación ocurre cuando el gradiente hidráulico de las tuberías sobrepasa la cota de terreno. Este volumen de inundación sale por la cámara de AALL y permanece fuera de la red, hasta que esta tenga capacidad suficiente para que pueda volver a ingresar al sistema. (Rossman, 2015)

Una vez ingresada toda la información antes descrita en el SWMM, se obtienen los volúmenes de inundación del sector de estudio, bajo el escenario actual. Luego, se debe ingresar las infraestructuras verdes en el SWMM, creando el “escenario verde”, lo cual permite conocer los volúmenes de inundación con la implementación de las mismas. Para crear el “escenario verde” la información a ingresar va a depender del tipo de infraestructura verde seleccionada, sin embargo, de manera general se ingresa al SWMM la siguiente información:

- Superficie.
- Suelo.
- Almacenamiento.
- Drenaje subterráneo.

Una vez creado el “escenario verde”, es posible comparar los volúmenes de inundación de este, en relación con el escenario actual. El resultado esperado del presente paso es conocer los volúmenes de inundación del sector de estudio, antes y después de la implementación de la infraestructura verde urbana, de tal manera que se pueda determinar si es una alternativa viable para la reducción de la escorrentía y mitigación de las inundaciones en la ciudad de Durán.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

IV.1. Selección del sector de estudio.

De acuerdo con los criterios de selección establecidos en la Metodología, a continuación, se presenta la Tabla 4.1 y la Figura 4.1, en las cuales se encuentran todos los sectores de Cantón Durán que están categorizados con el uso de suelo residencial:

Tabla 4.1. Sectores del Cantón Durán con uso de suelo residencial.

Sectores			
12 de noviembre	Abel Gilbert Pontón #2	Santa Marianita	Carlos Carrera
16 de octubre	Aire Libre	Unidad Nacional	Cipreses
18 de abril	Alberto Maldonado	Algarrobos	Roberto Gilbert
2 de mayo	Unión y Progreso	Abel Gilbert Pontón #1	Los Naranjos
27 de diciembre	Unidos Venceremos #1	El Trébol	Cali Murillo
28 de agosto #1	Unidos Somos Más	Ana María de Olmedo	San Gabriel
María Luisa Gilbert	Los Mirlos	Hogar y Techo	Elsa Bucaram
Luz María	Popular Guayas	El Recreo #1	La Unión
Modular	Guayaquil Independiente	El Recreo #2	Balcones de Panorama
Los Cipreses #1	San Carlos	El Recreo #3	Brisas de Santay

Tabla 4.1. Sectores del Cantón Durán con uso de suelo residencial (continuación).

Sectores			
Valparaíso #2	Héctor Cobos #1	El Recreo #4	Panorama
Atahualpa	Héctor Cobos #2	El Recreo #5	Centro de Durán
Eco. Fernando Díaz	Rina Ortiz de Bucaram	Coop. De Trans. 16 de Octubre	Los Helechos
Alfonso Oramas Gonzáles	Guillermo Molina de Frank	SECAP	Brisas del Guayas
Pedro Menéndez	Rosa Hanna de Muse	La Pirámide	Abel Gilbert Pontón #3
Primavera #1	Democrática Norte #1	Brisas del Estero	Democrática Sur
Río Guayas	Democrática Norte #2	Barrio Lindo	Primavera #2
Combatientes del 41	Los Sauces	Los Esteros	Las Terrazas
Héroes Nacionales	Urdenor	Peñón del Río	Recreo Viejo
Los Almendros	Estación del Tren	Montanavi	Colinas del Valle
Ferroviaria #3	El Mirador	Ferroviaria #2	Colinas de Durán
Las Villas	Arriba Durán	Hogar San José	Negama
Mutualistas			
Valparaíso #1	Cerro Las Cabras	Héctor Cobos #3	María Piedad
Colinas del Recreo	Centro Vial	Héctor Cobos #4	Nueva Vida 2000
San Enrique	El Dorado	El Bosque	Valle Grande
Santa Rosa	Tiwinsa	San Jacinto	Cristina Puig
Los Rosales	Grillo Gilbert	Antonio José de Sucre	Jesús del Gran Poder
Los Geranios	Martha Bucaram de Roldós	Cinco Hermanas	Edén
Gregorio #1	Policía Nacional	Gregorio #2	El Ejército
28 de agosto #2	Leonor Elizalde de Gilbert	El Cóndor	Las Violetas
Pueblo Organizado	Galileo Galilei	Marfingra	Por un futuro mejor
Una sola fuerza #1	Una sola fuerza #2	Ficus #4	Ficus #3
San Genaro	Mariana de Jesús	Ficus#2	Ficus#1
Una sola fuerza #3	Valle de los lirios	Nuevos Horizontes #1	Nuevos Horizontes #2
Chojampe	Ángel Pután	Frente de lucha popular	Primero de mayo
Divino Niño	Dos hermanos	Gladys Maldonado	General Alfaro
Julio Coll	Mi Hogar	Edén #1	La Pastora

Tabla 4.1. Sectores del Cantón Durán con uso de suelo residencial (continuación).

Sectores			
Los algarrobos norte	José Joaquín de Olmedo	Nuevo Guayaquil	Arturo Guevara
Angélica Alarcón La Peregrina	Jorge Valdez 5 de junio	Los Tulipanes Derecho de los pobres	La Dolorosa Los Cerezos
Progreso	Gabriel García Moreno	10 de agosto	12 de agosto
Gladys Mora García	Los Álamos	Jorge Bataglia	Oswaldo Hurtado
José Poli Vera	Jacaranda	Angela Alarcón	Enrique Ponce Ávila
Hilada Somisterra	Nueva Jerusalem	La Unión	Bienestar para todos
6 de octubre Parques del Este	Brisas del Recreo San Enrique	Las Brisas El Pantanal	Fincas Delia Unidos
Durán Norte	Bellavista	La Esperanza	Venceremos #2
Las Gaviotas	Nuevo Durán	Amazonas	Los Claveles
Arcoíris	Las Garzas	La Tolita	El Portal
El Tejar	Las Brisas	Luz Bolivariana	Los Caracoles
Intriago Dillon	Hugo Baquerizo Domínguez	Macías Porro	7 hermanas
Nueva Luz	La Herradura		El Paraíso

Fuente: Dirección de Planeamiento Urbano del Municipio de Durán. (2019).

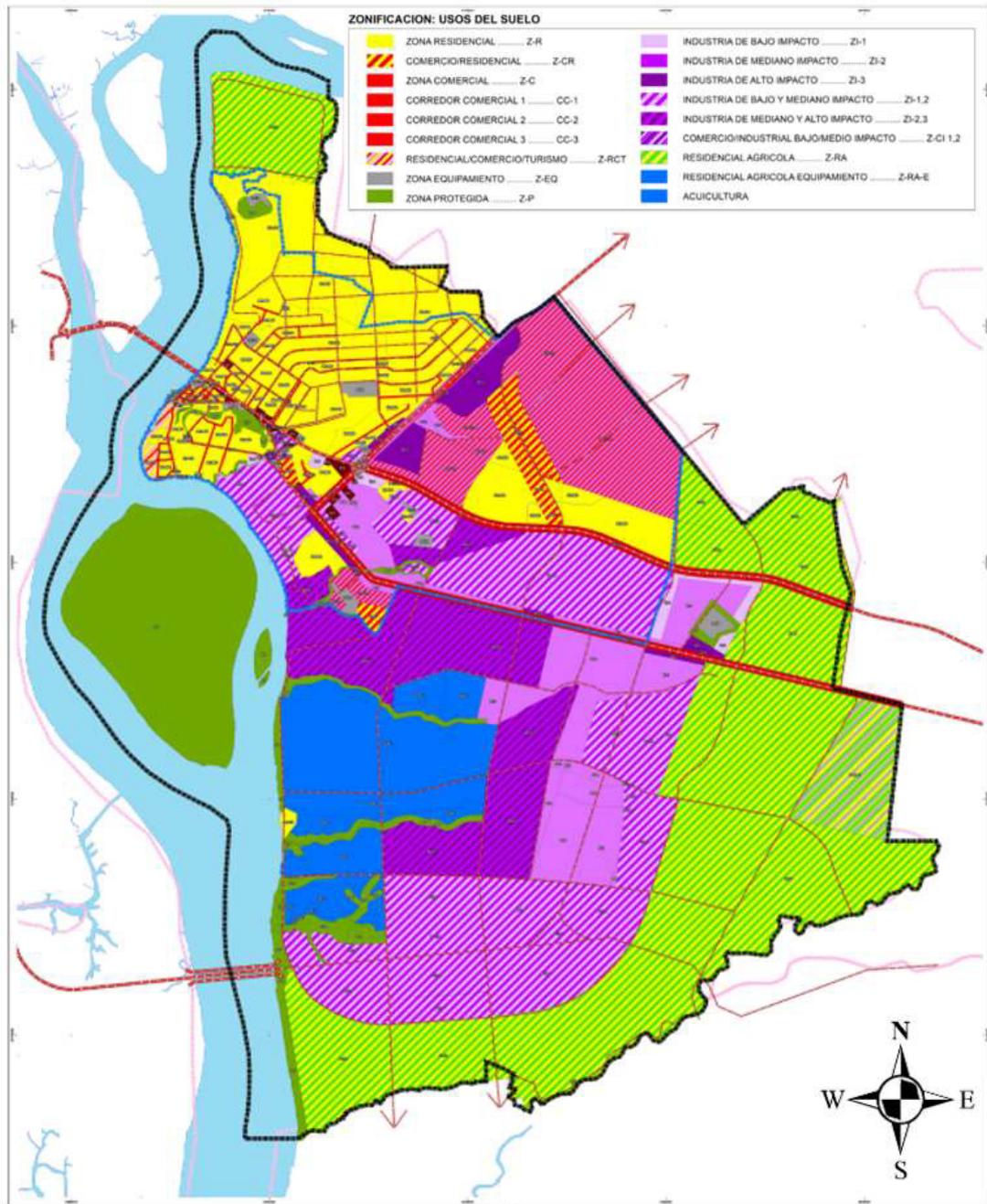


Figura 4.1. Mapa del modelo de uso de suelo del Cantón Durán 2019-2023.
Fuente: Dirección de Planeamiento Urbano del Municipio de Durán. (2019).

Según los criterios de selección establecidos en la Metodología, a continuación, se presenta la Tabla 4.2 y la Figura 4.2, en las cuales se especifican todos los sectores de Cantón Durán que cuentan con red de alcantarillado pluvial:

Tabla 4.2. Sectores del Cantón Duran con red de alcantarillado pluvial.

Sectores			
12 de noviembre	Abel Gilbert Pontón #2	Santa Marianita	Carlos Carrera
16 de octubre	Aire Libre	Unidad Nacional	Cipreses
18 de abril	Alberto Maldonado	Algarrobos	Roberto Gilbert
2 de mayo	Unión y Progreso	Abel Gilbert Pontón #1	Los Naranjos
27 de diciembre	Unidos Venceremos #1	El Trébol	Cali Murillo
28 de agosto #1	Unidos Somos Más	Ana María de Olmedo	San Gabriel
María Luisa Gilbert	Los Mirlos	Hogar y Techo	Elsa Bucaram
Luz María	Popular Guayas	El Recreo #1	La Unión
Modular	Guayaquil Independiente	El Recreo #2	Balcones de Panorama
Los Cipreses #1	San Carlos	El Recreo #3	Brisas de Santay
Valparaíso #2	Héctor Cobos #1	El Recreo #4	Panorama
Atahualpa	Héctor Cobos #2	El Recreo #5	Centro de Durán
Eco. Fernando Díaz	Rina Ortiz de Bucaram	Coop. De Trans. 16 de Octubre	Los Helechos
Alfonso Oramas Gonzáles	Guillermo Molina de Frank	Secap	Brisas del Guayas
Pedro Menéndez	Rosa Hanna de Muse	La Pirámide	Abel Gilbert Pontón #3

Tabla 4.2. Sectores del Cantón Duran con red de alcantarillado pluvial
(continuación).

Sectores			
Primavera #1	Democrática Norte #1	Brisas del Estero	Democrática Sur
Río Guayas	Democrática Norte #2	Barrio Lindo	Primavera #2
Combatientes del 41	Los Sauces	Los Esteros	Las Terrazas
Héroes Nacionales	Urdenor	Peñón del Río	Recreo Viejo
Los Almendros	Estación del Tren	Montanavi	Colinas del Valle
Ferroviaria #3	El Mirador	Ferroviaria #2	Colinas de Durán
Las Villas	Arriba Durán	Hogar San José	Negama
Mutualistas			
Valparaíso #1	Cerro Las Cabras	Héctor Cobos #3	María Piedad
Colinas del Recreo	Centro Vial	Héctor Cobos #4	Nueva Vida 2000
San Enrique	El Dorado	El Bosque	

Fuente: Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Durán. (2020).

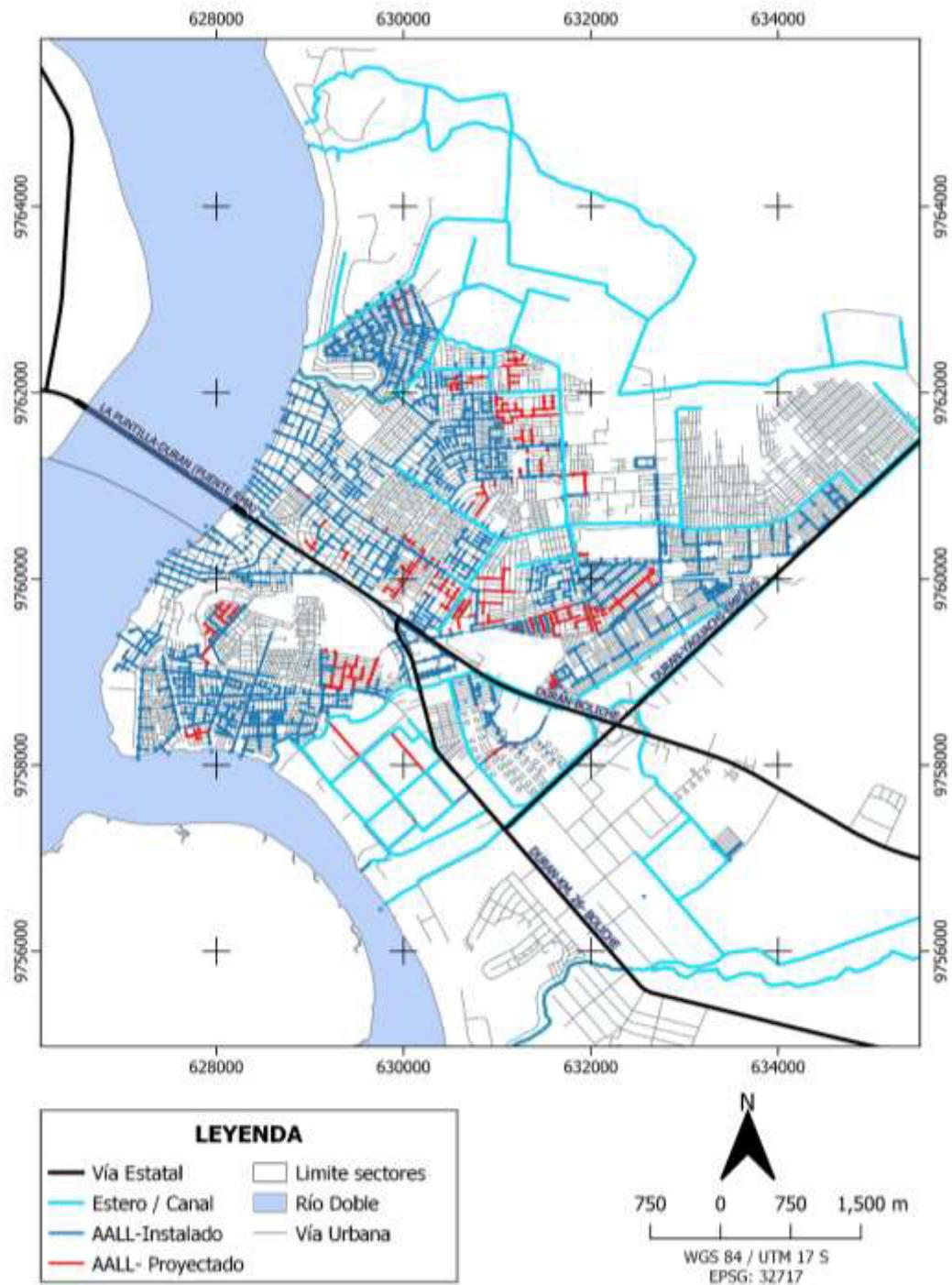


Figura 4.2. Mapa de la red de alcantarillado pluvial del Cantón Durán.
 Fuente: Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Durán. (2020).

En base con los criterios de selección establecidos en la Metodología, a continuación, se presenta la Tabla 4.3 y la Figura 4.3, en las cuales se detallan todos los sectores de Cantón Durán que cuentan con el suelo impermeabilizado, puesto que sus calles están asfaltadas:

Tabla 4.3. Sectores del Cantón Duran con suelo impermeabilizado.

Sectores			
12 de noviembre	Abel Gilbert Pontón #2	Santa Marianita	Carlos Carrera
18 de abril	Aire Libre	Unidad Nacional	Cipreses
Alfonso Oramas Gonzáles	Alberto Maldonado	Algarrobos	Centro de Durán
Pedro Menéndez	Popular Guayas	Abel Gilbert Pontón #1	Los Helechos
Primavera #1	Guayaquil Independiente	SECAP	Cali Murillo
Río Guayas	San Carlos	Ana María de Olmedo	San Gabriel
Combatientes del 41	Héctor Cobos #2	Hogar y Techo	Elsa Bucaram
Los Almendros	Héctor Cobos #3	El Recreo #1	Brisas de Santay
Ferrovial #3	Arriba Durán	El Recreo #2	Panorama
Las Villas Mutualistas	Democrática Norte #1	El Recreo #3	Brisas del Estero
San Enrique	Democrática Norte #2	El Recreo #4	Peñón del Río
Ferrovial #2	Abel Gilbert Pontón #3	El Recreo #5	Cerro Las Cabras
Democrática Sur	Barrio Lindo	Los Esteros	Las Terrazas
Primavera #2			

Fuente: Dirección de Obras Públicas del Municipio de Durán. (2020).

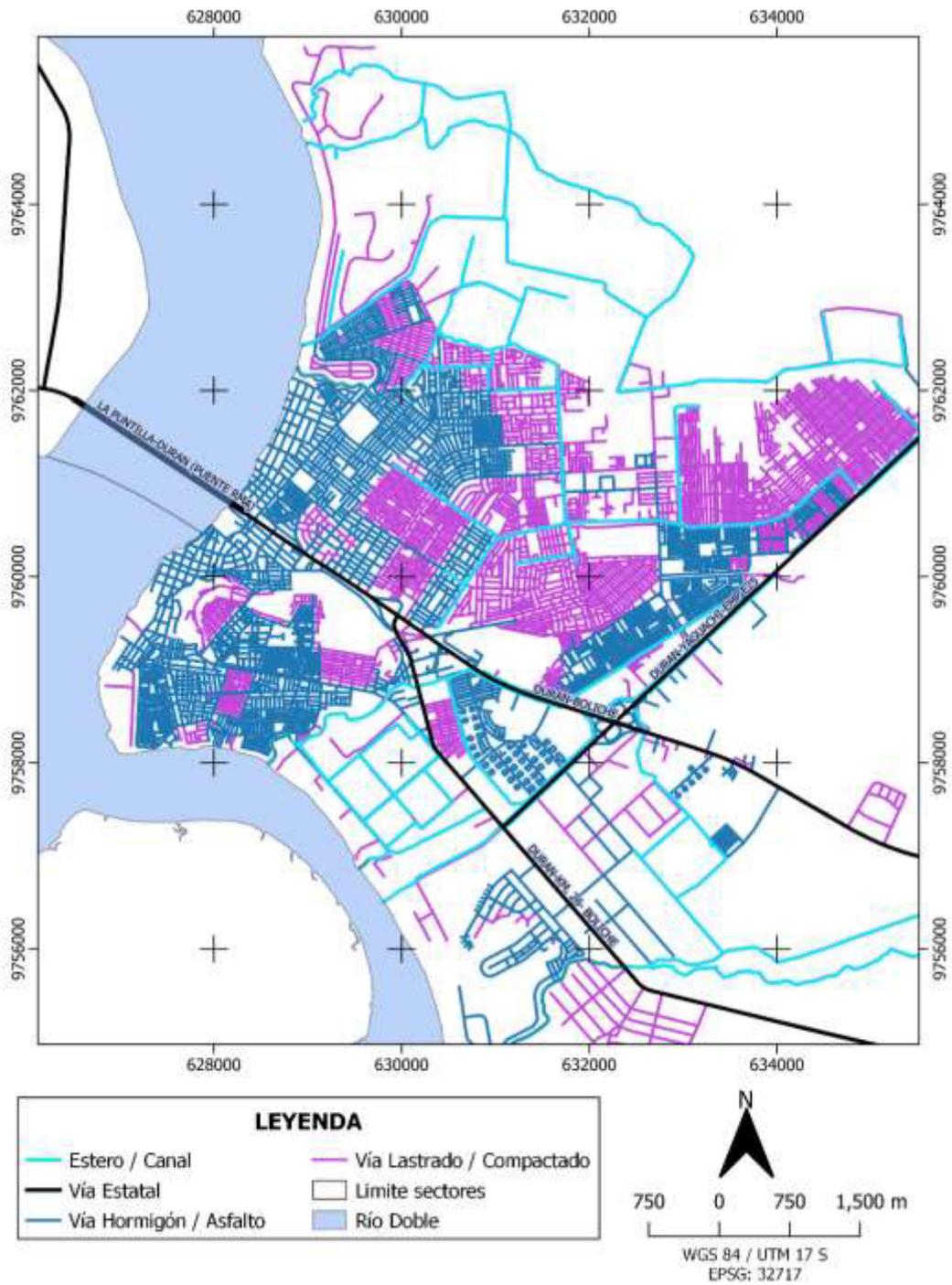


Figura 4.3. Mapa de la red vial del Cantón Durán.

Fuente: Dirección de Obras Públicas del Municipio de Durán. (2020).

En relación con los criterios de selección establecidos en la Metodología, a continuación, se presenta la Tabla 4.4 y la Figura 4.4, en las cuales se indican todos los sectores de Cantón Durán que presentan riesgo muy alto ante la amenaza de las inundaciones:

Tabla 4.4. Sectores del Cantón Durán con riesgo muy alto ante inundaciones.

Sectores			
El Recreo #1	El Recreo #2	El Recreo #3	El Recreo #5
Abel Gilbert Pontón #1	Héctor Cobos #1	Héctor Cobos #2	Cristina Puig
Nueva Jerusalem	28 de agosto	5 de junio	Brisas del Recreo
Divino Niño	María Luisa Gilbert	Jesús del gran poder	Guillermo Gilbert Estrada
Alfonso Oramas Gonzáles	Elsa Bucaram	La Herradura	Cali Murillo
Balcones de Panorama	Los Naranjos	Nuevos Horizontes #1	Nuevos Horizontes #2
San Enrique	10 de agosto	16 de octubre	Nuevos Horizontes
Una Sola Fuerza #1	Una Sola Fuerza #2	Bienestar para todos	Colinas del Recreo
Edén	Derecho de los pobres	Gregorio #1	Gregorio #2

Fuente: Proyecto RESCLIMA. (2019).

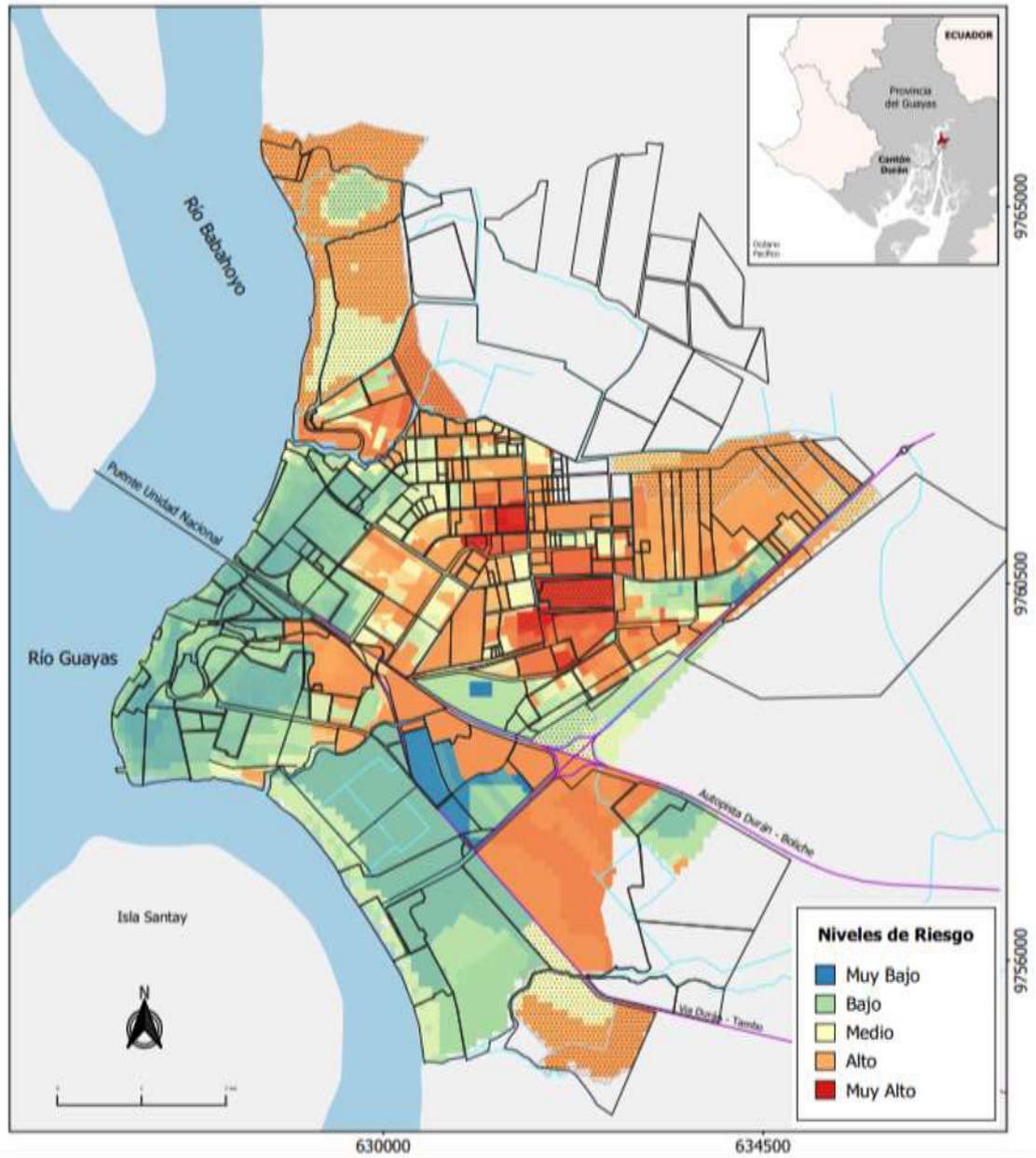


Figura 4.4. Mapa de riesgo ante inundaciones.

Fuente: Proyecto RESCLIMA. (2019).

El Cantón Durán cuenta con 206 sectores con uso de suelo residencial, 98 sectores poseen alcantarillado pluvial, 53 sectores tiene sus calles asfaltadas y 36 sectores presentan riesgo muy alto ante la amenaza de inundaciones. A continuación, se presenta el listado de sectores que cumplen con los criterios antes mencionados:

- Alfonso Oramas Gonzáles.
- Héctor Cobos sector #2.
- El Recreo etapa #1.
- El Recreo etapa #2.
- El Recreo etapa #3.
- El Recreo etapa #5.
- Cali Murillo.
- Elsa Bucaram.

Una vez obtenida la lista corta de potenciales sectores de estudio, se procedió a definir el sector específico, de acuerdo a los metros cuadrados de áreas verdes disponibles.

Según información de la Dirección de Mantenimiento de Espacios Públicos del Municipio de Durán, los potenciales sectores de estudio presentan la siguiente cantidad de metros cuadrados de áreas verdes (ver Tabla 4.5.):

Tabla 4.5. Metros cuadrados de áreas verdes de potenciales sectores de estudio.

Sectores	Metros cuadrados totales	Metros cuadrados de áreas verdes	Porcentaje de áreas verdes
Alfonso Oramas Gonzáles	409.600	0	0%
Héctor Cobos sector #2	183.600	0	0%
Cali Murillo	45.000	848	1,88%
Elsa Bucaram	90.000	0	0%
El Recreo etapa #1	266.600	3.960	1,48%
El Recreo etapa #2	265.248	3.142	1,18%
El Recreo etapa #3	448.000	2.912	0,65%
El Recreo etapa #5	489.538	10.328	2,10%

Una vez analizado cada potencial sector de estudio, en base a los criterios de selección, el lugar elegido para realizar el presente trabajo es la Ciudadela El Recreo 5ta. Etapa, debido a su mayor número de metros cuadrados de áreas verdes.

IV.2. Análisis del sector de estudio y selección de tipo de infraestructura verde más adecuada.

Luego de ser seleccionada la Ciudadela El Recreo 5ta. Etapa (ver Figura 4.5.) como sector de estudio, se procedió al análisis respectivo sobre el potencial de implementación de infraestructura verde en la zona, en base a las siguientes características específicas: diseño de las calles, diseño de las aceras, estimación de metros cuadrados de áreas verdes y metros cuadrados de espacio público disponible.

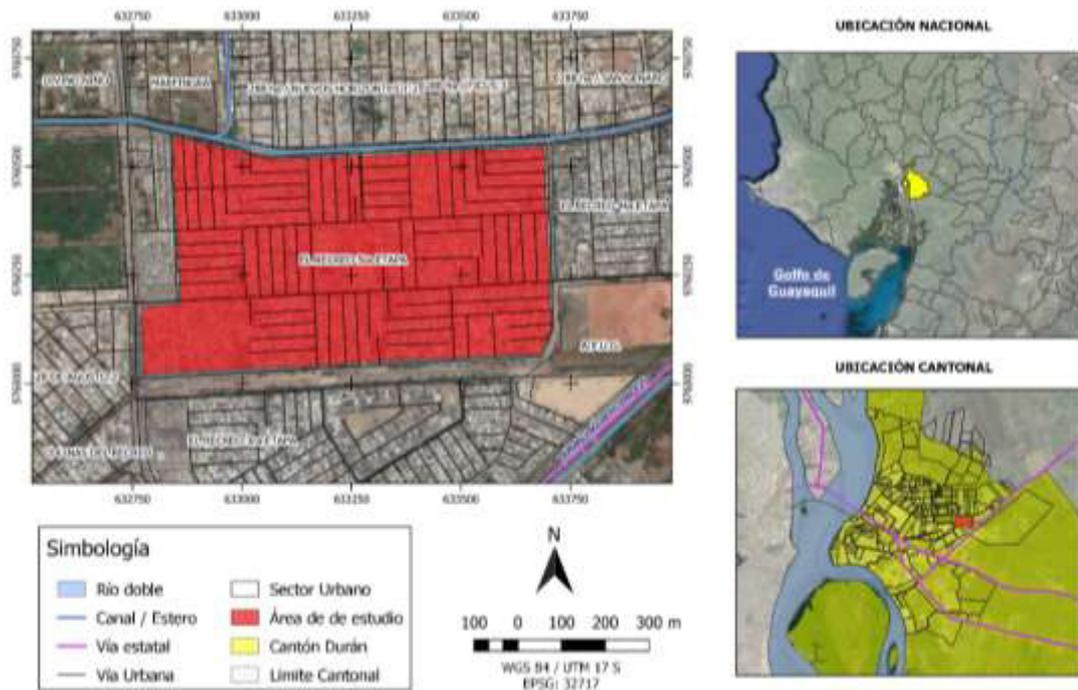


Figura 4.5. Mapa de ubicación del sector de estudio.

La infraestructura vial del sector de estudio se encuentra conformada por cuatro calles en sentido Este-Oeste y seis calles en sentido Norte-Sur. El material de las calles es de hormigón y asfalto. Presentan un ancho mínimo de cinco metros y máximo de 25 metros, así como una longitud mínima de 140 metros y máxima de 930 metros. El sentido de las calles es de doble vía, con un mínimo de dos carriles y un máximo de seis carriles. La mayoría de las calles no presentan espacio definido para parquear vehículos, sin embargo, se utilizan los carriles próximos a las aceras como espacio de parqueo (ver Figura 4.6.). Únicamente dos calles presentan parterre central, con un ancho de cinco metros y 0.92 metros respectivamente.



Figura 4.6. Calle principal de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo.

La infraestructura peatonal del sector de estudio está compuesta por aceras de cemento, las cuales presentan en su gran mayoría un ancho estándar de dos metros, sin embargo, en las calles más angostas presentan aceras con un ancho mínimo de 1.20 metros y en las calles más amplias aceras con un máximo de 4.85 metros. La altura de las aceras es de un estándar de 15 centímetros.

Tal como indicamos en la sección anterior (selección del sector de estudio), la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo presenta 10.328 m² de áreas verdes (ver Figura 4.7.). En cuanto al espacio público disponible, la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo tiene la particularidad de contar con predios destinados como parqueaderos para los vehículos de los habitantes de este sector (ver Figura 4.8.). Hay un total de 10 predios de este tipo, sumando un total de 13.400 m². Así mismo, entre la 3ra. y la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo, se encuentran los rieles del ferrocarril, siendo esta la

referencia que separa las mencionadas etapas, con una disponibilidad de espacio de 18.100 m² (ver Figura 4.9.).



Figura 4.7. Parque principal de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo.



Figura 4.8. Parqueadero público de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo.



Figura 4.9. Rieles del ferrocarril entre la 3ra. y 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo.

Finalmente, en cuanto a parterres centrales y aceras que pueden ser aprovechados, ya que se cuenta con suficiente espacio, se cuenta con un parterre central de cinco metros de ancho (ver Figura 4.10.) y una acera con 4.85 metros de ancho (ver Figura 4.11.), de la cual se puede usar 2.5 metros, puesto que la diferencia se debe mantener para uso peatonal, por lo que hay disponibilidad de 4.000 m².



Figura 4.10. Parterre central más ancho de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo.



Figura 4.11. Acera más ancha de la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo.

En total, la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo presenta un potencial aproximado de 45.828 m² de espacio público disponible, para implementar infraestructura verde para control de inundaciones.

Una vez establecido el espacio disponible para la implementación de infraestructura verde, en base a las particularidades del sector de estudio, se ha optado por seleccionar al jardín de lluvia, celda de bio-retención y pavimento permeable

El jardín de lluvia es potencialmente aplicable en el sector de estudio, debido a que su implementación es ideal para zonas residenciales, dentro de las cuales se pueden aprovechar los siguientes espacios públicos:

- Áreas de recreación o parques.
- Aceras.
- Parterres centrales de calles.
- Islas de tráfico.
- Rotondas.
- Callejones sin salida.
- Áreas permeables entre edificios.
- Bordes de estacionamientos.

Específicamente para el sector de estudio, los jardines de lluvia pueden ser ubicados en los 10.328 m² de parques o áreas de recreación, así como en los parterres centrales de las calles y en las aceras más amplias, es decir 4.000 m². En total 14.328 m² de jardines de lluvia.

La celda de bio-retención es una infraestructura similar al jardín de lluvia, sin embargo, esta se utiliza para zonas más amplias, siendo capaz de almacenar, infiltrar y evaporar tanto la lluvia directa como la escorrentía de áreas circundantes. Por lo tanto, es potencialmente aplicable en el sector de los rieles del ferrocarril, entre la 3ra. y 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo, es decir en 18.100 m².

El pavimento permeable presenta potencial de aplicación en el sector de estudio, puesto que también es recomendable su implementación en zonas residenciales, pudiendo aprovechar los siguientes espacios públicos:

- Calles o vías (uso limitado).
- Estacionamientos.
- Plazas.
- Áreas peatonales.
- Campos de juego públicos.
- Callejones.

En el sector de estudio, el pavimento permeable puede ser implementado las 10 áreas de parqueo público existentes, es decir 13.400 m², siendo juntamente este tipo de espacios los recomendados para implementar la mencionada infraestructura verde, debido al poco y liviano tráfico vehicular que debe soportar, lo cual permite un correcto desenvolvimiento del sistema de infiltración y evita daños en el mismo.

A fin de ilustrar la ubicación de las infraestructuras verdes seleccionadas, en la Figura 4.12 se presenta el sector de estudio con los sitios específicos donde se plantea la implementación de estas infraestructuras.

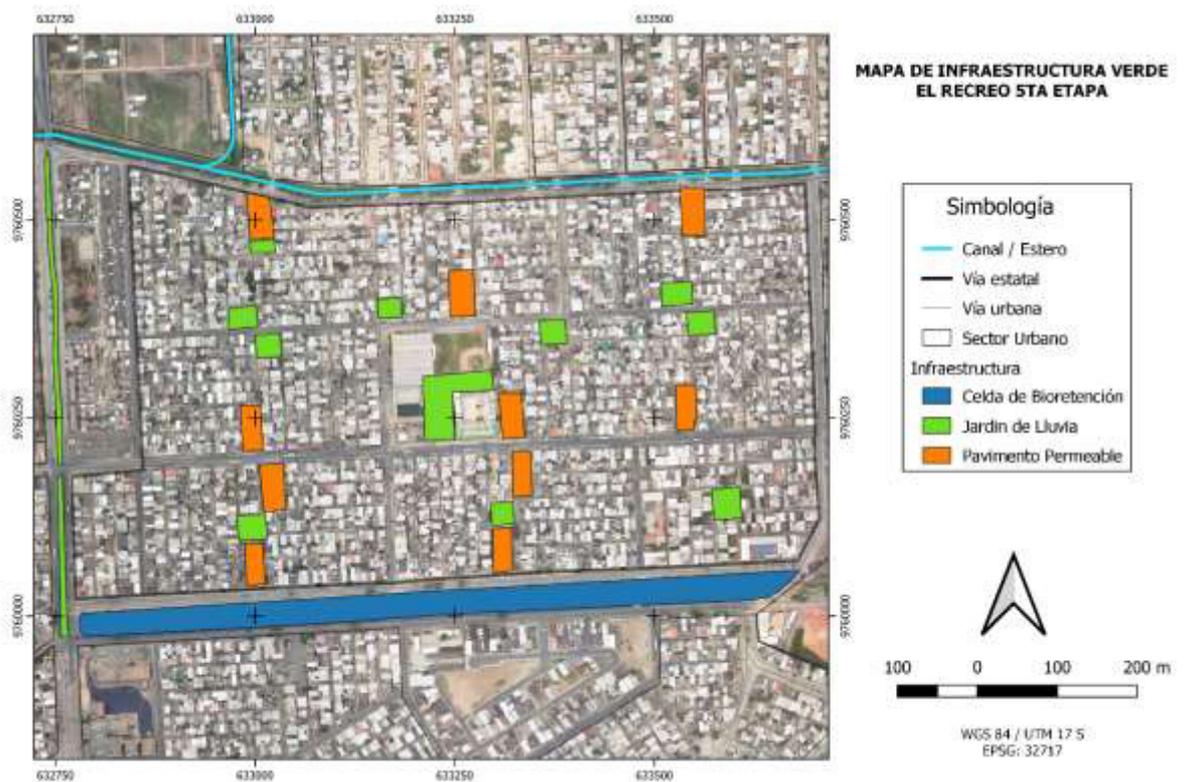


Figura 4.12. Ubicación de las infraestructuras verdes seleccionadas en la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo.

IV.3. Modelar y comparar la gestión de la escorrentía.

Se seleccionaron las siguientes opciones de simulación (ver Figura 4.13.) para crear el escenario actual:

- Modelos de proceso: lluvia/escorrentía y enrutamiento de flujo.
- Modelo de infiltración: número de curva.
- Varios: permitir encharcamiento y una pendiente mínima de conducto de 0%.
- Modelo de enrutamiento: onda dinámica.
- Reporte: 0 días y cada 15 minutos.
- Escorrentía en clima seco: 0 días y cada 1 hora.
- Escorrentía en clima húmedo: cada 5 minutos.
- Periodos de flujo constante: tolerancia al flujo del sistema de 5% y tolerancia al flujo lateral de 5%.
- Término nterial: Dampen.
- Criterio de caudal normal: ambos.
- Fuerza de la ecuación principal: Darcy-Weisbach.
- Uso de pasos de tiempo variable ajustado al 75%.
- Paso de tiempo para el alargamiento de conductos de 0 segundos.
- Área mínima de superficie nodal: 1.14 metros cuadrados.
- Ensayos máximos por intervalo de tiempo: 8.
- Tolerancia de convergencia de la cabeza: 0.0015 metros.

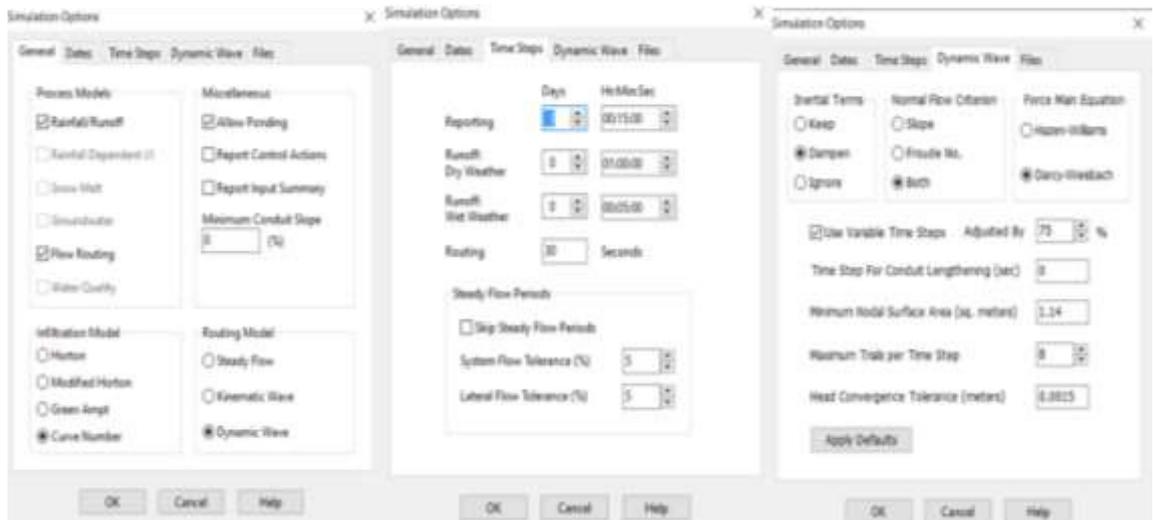


Figura 4.13. Opciones de simulación seleccionadas del SWMM.

Luego la siguiente estructura y parametrización fue ingresada en el programa SWMM:

Áreas de aportación a las cámaras de alcantarillado pluvial:

- Área de aportación: 47 sub-cuencas a aportación, con un rango de áreas entre 0.23 ha y 2.74 ha y un área total de aportación al sistema de 69.7 ha aproximadamente.
- Porcentaje de área permeable entre el 10% y 70%.
- Porcentaje de área impermeable entre el 30% y 90%.
- Pendiente promedio del área entre 0.3 m y 0.5 m.
- Coeficiente de rugosidad de Manning para la zona permeable de 0.1.
- Coeficiente de rugosidad de Manning para la zona impermeable de 0.01.

Cámaras de alcantarillado pluvial, un total de 49:

- Cota de fondo entre -0.959 m y 3.84 m.
- Cota del terreno entre 2.20 m y 4.85 m.

Tuberías:

- Material de hormigón.

- Cota de entrada y salida con valores entre -0.959 m y 3.84 m.
- Longitud entre 5 m y 127.4 m. Todo el sistema cuenta con 3.7 km de tuberías.
- Pendiente de instalación es variable con un rango de 0.5%.

Descargas, una descarga:

- Cota de fondo entre -0.95 m y 1.75 m.
- Nivel de agua del cuerpo receptor con cota de 1.5 msnm.

Lluvia de diseño:

- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 2 años.
- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 5 años.
- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 10 años.
- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 25 años.
- Hietograma Acumulado para periodo de recurrencia de 50 años.

No se obtuvo información sobre la variación de niveles en el canal donde descarga la red, por lo que se optó por considerar un nivel fijo en la descarga de 1.5 m. Este nivel considera que el canal no se desborda, ya que la vía que se encuentra junto a este, tiene una cota promedio aproximada de 2.25 m. El canal sobre el cual descarga la red forma parte del estero “La Matanza” y el punto de descarga se encuentra a una distancia de aproximada de 4 Km de la desembocadura en el Río Babahoyo.

Una vez ingresados los datos al SWMM y ejecutado la modelación, se obtienen los volúmenes de inundación del sector de estudio, para cada periodo de recurrencia, bajo el escenario actual.

Se creó el “escenario verde”, a partir de la siguiente estructura y parametrización de las celdas de bioretención, jardines de lluvia y pavimento permeable:

Celdas de bioretención:

- Área total de 1.81 ha.
- Superficie, conformada por una berma 150 mm, fracción de cobertura vegetal de 0.8 (relación volumen sobre volumen total), rugosidad de la superficie de 0 y pendiente superficial de 0%.
- Suelo, con una capa de espesor de 700 mm, porosidad de 0.4 (relación volumen de poros sobre volumen total), capacidad de retención de 0.3 (relación volumen de agua que se puede almacenar en los poros sobre el volumen total), punto de marchitez de 0.1, conductividad de 0.5 mm/hr, pendiente de conductividad de 0.5 y cabeza de succión de 3.5 mm. Los 700 mm se dividen en 100 mm de madera triturada, 500 mm de una mezcla de arcilla/grava y 100 mm de grava.
- Almacenamiento, de con espesor de 300 mm (compuesta por grava), una relación de vacíos de 0.75 (fracción vacíos/sólidos), tasa de infiltración de 0.5 mm/hr y factor de obstrucción de 0 (obstrucción de 0%).
- Coeficiente de flujo de 2.93 (coeficiente adimensional), exponente de flujo de 0.5 (coeficiente adimensional) y una altura de compensación de 0 mm. Drenaje subterráneo, con una tubería de 150 mm de diámetro interior y 5 perforaciones de 10 mm de diámetro por cada metro de tubería.

En la Figura 4.14 se ilustra los parámetros ingresados en el SWMM para las celdas de bio-retención:

The figure displays four screenshots of the SWMM Bio-Retention Cell parameter dialog boxes, arranged in a 2x2 grid. Each dialog shows a cross-section diagram of a bio-retention cell with 'Surface', 'Soil', and 'Storage' layers, and an 'Underdrain' at the bottom. The parameters are organized into columns: Surface, Soil, Storage, and Underdrain. Each dialog has 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Control Name	Surface	Soil	Storage	Underdrain
CELDA-BIO-RETENCION	Berm Height (in. or mm)	Vegetation Volume Fraction	Surface Roughness (Mannings n)	Surface Slope (percent)
CELDA-BIO-RETENCION	Thickness (in. or mm)	Porosity (volume fraction)	Field Capacity (volume fraction)	Wilting Point (volume fraction)
CELDA-BIO-RETENCION	Thickness (in. or mm)	Void Ratio (Fluids / Solids)	Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	Clogging Factor
CELDA-BIO-RETENCION	Flow Coefficient*	Flow Exponent	Offset Height (in. or mm)	

*Units are for flow in either in/hr or mm/hr; use 0 if there is no underdrain.

Figura 4.14. Parámetros ingresados en el SWMM para las celdas de bio-retención.

En la figura 4.15 se aprecia el plano esquemático de las celdas de bio-retención con las dimensiones antes descritas:

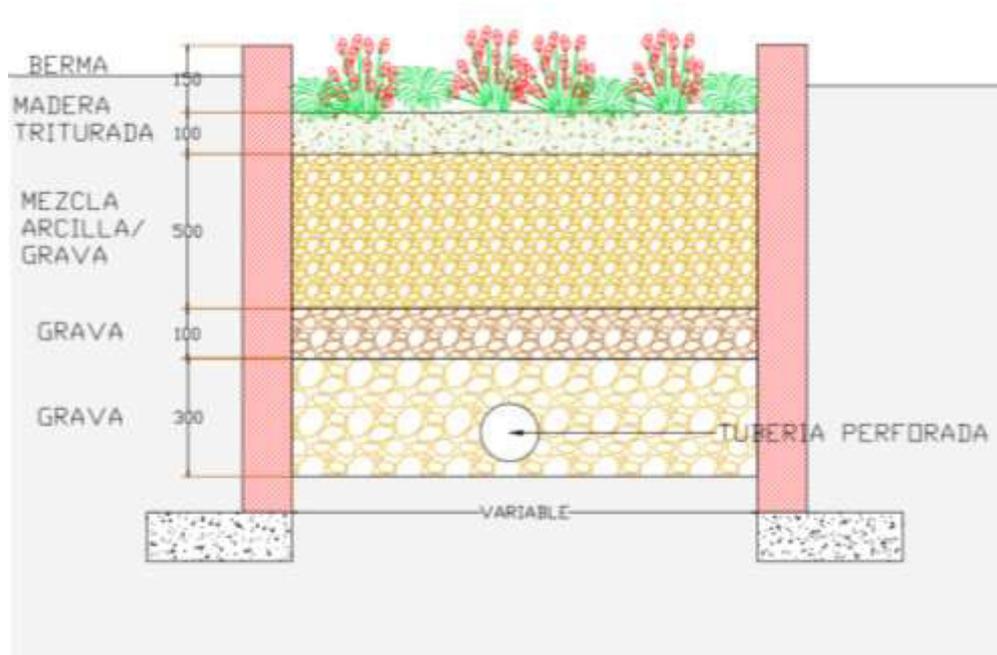


Figura 4.15. Plano esquemático de las celdas de bio-retención.

Jardines de lluvia:

- Área total de 1.43 ha.
- Superficie, conformada por una berma 300 mm, una fracción de cobertura vegetal de 0.8 (relación volumen sobre volumen total), rugosidad de la superficie de 0 y pendiente superficial de 0%.
- Suelo, con una capa de espesor de 700 mm, porosidad de 0.4 (relación volumen de poros sobre volumen total), capacidad de retención de 0.2 (relación volumen de agua que se puede almacenar en los poros sobre el volumen total), punto de marchitez de 0.1, conductividad de 0.5 mm/hr, pendiente de conductividad de 10 y cabeza de succión de 3.5 mm. Los 700 mm se dividen en 100 mm de madera triturada, 500 mm de una mezcla de arcilla/grava y 100 mm de grava.

En la Figura 4.16 se ilustra los parámetros ingresados en el SWMM para los jardines de lluvia:



Figura 4.16. Parámetros ingresados en el SWMM para los jardines de lluvia.

En la figura 4.17 se aprecia el plano esquemático de los jardines de lluvia con las dimensiones antes descritas:

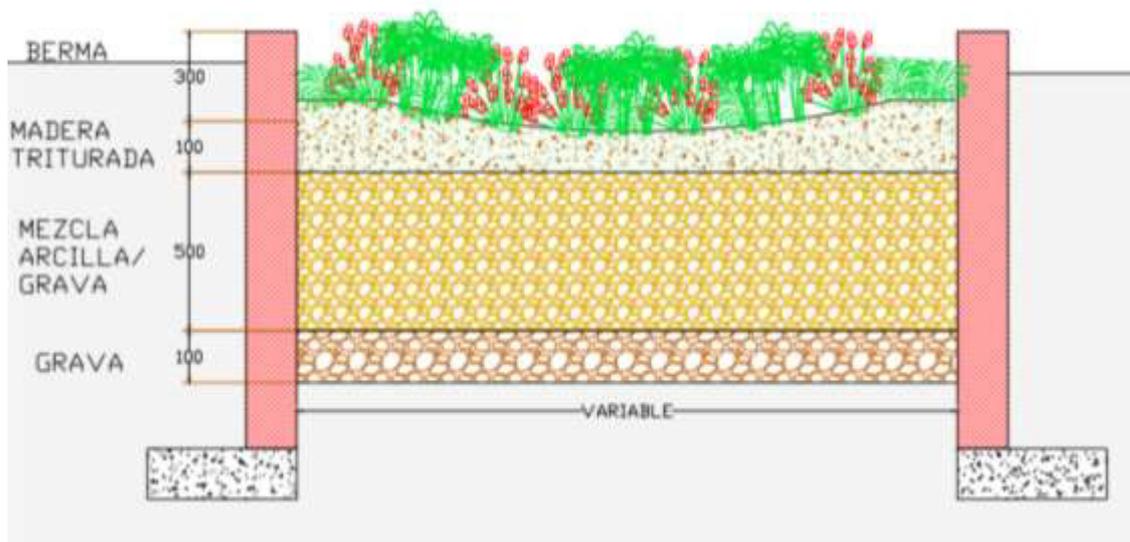


Figura 4.17. Plano esquemático de los jardines de lluvia.

Pavimento permeable:

- Área total de 1.34 ha.
- Superficie, conformada por una berma de 150 mm, una fracción de cobertura vegetal de 0, rugosidad de 0.011 y pendiente superficial de 2.5%.
- Asfalto poroso, con una capa de espesor de 170 mm, un 16% de huecos, relación de vacíos de 0.14 (fracción vacíos/sólidos), fracción de superficie impermeable de 0, permeabilidad de 100 mm/hr y factor de obstrucción de 0.3 (obstrucción de 30%).
- Almacenamiento, de con espesor de 300 mm, compuesta por cama granular de 50 mm, base granular 100 mm y sub-base granular 150mm. Relación de vacíos de 0.5 (fracción vacíos/sólidos), tasa de filtración de 0.5 mm/hr y factor de obstrucción 0 (obstrucción de 0%).
- Coeficiente de flujo de 4.71 (coeficiente adimensional), exponente de flujo de 0.5 (coeficiente adimensional) y altura de compensación de 0 mm. Drenaje subterráneo, con una tubería de 150 mm de diámetro interior y 5 perforaciones de 10 mm de diámetro por cada metro de tubería.

En la Figura 4.18 se ilustra los parámetros ingresados en el SWMM para el pavimento permeable:

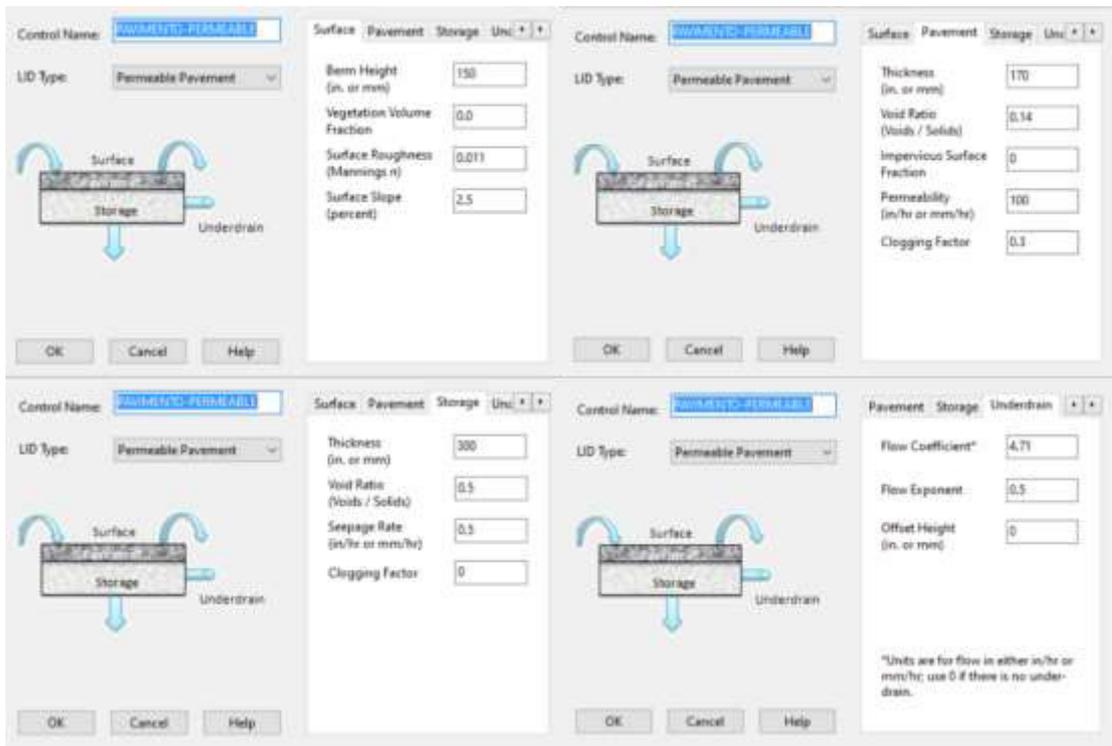


Figura 4.18. Parámetros ingresados en el SWMM para el pavimento permeable.

En la figura 4.19 se aprecia el plano esquemático del pavimento permeable con las dimensiones antes descritas:

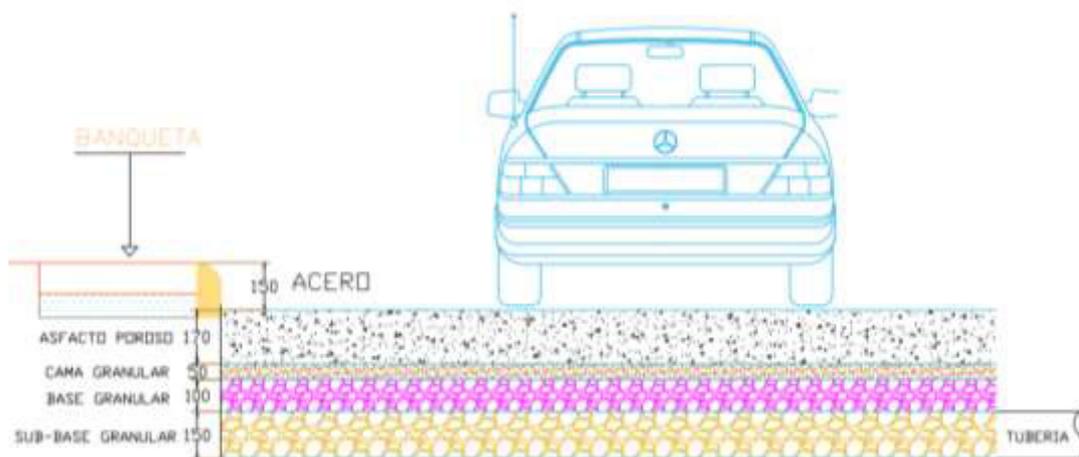


Figura 4.19. Plano esquemático del pavimento permeable.

A continuación, en la Figura 4.20 se presenta como se visualiza el modelo ya concluido desde el programa SWMM, ilustrando las tuberías que conforman la red de alcantarillado pluvial, el punto de descarga y el canal (cuerpo receptor) que form parte del estero “La Matanza”.



Figura 4.20. Visualización del modelo ya concluido.

Los parámetros ingresados para la creación del “escenario verde”, fueron definidos en base a las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, en su publicación “*Army Low Impact Development Technical User Guide*”.

En la Tabla 4.6 se presentan los volúmenes de inundación del escenario actual vs. el escenario verde, para cada periodo de recurrencia, así como su respectivo porcentaje de reducción.

Tabla 4.6. Volúmenes de inundación del escenario actual vs. el escenario verde.

Periodo de recurrencia (años)	Volumen de inundación (m3) del escenario actual	Volumen de inundación (m3) del escenario verde	Porcentaje de reducción del volumen de inundación
2	2201	1496	32%
5	5988	4793	20%
10	9397	7783	17%
25	15218	13282	13%
50	20574	19140	7%

A fin de determinar cuál infraestructura verde aporta más a la reducción de los volúmenes de inundación, se optó por modelar de forma individual a cada una. En la Tabla 4.7 se presenta la comparación de los volúmenes de inundación del escenario actual con los del “escenario verde”, utilizando únicamente jardines de lluvia, así como el porcentaje de reducción de los volúmenes de inundación.

Del mismo modo, en la Tabla 4.8 se presenta la comparación de los volúmenes de inundación del escenario actual con los del “escenario verde”, utilizando únicamente cerdas de bio-retención, así como el porcentaje de reducción de los volúmenes de inundación.

Finalmente, en la Tabla 4.9 se presenta la comparación de los volúmenes de inundación del escenario actual con los del “escenario verde”, utilizando únicamente pavimento permeable, así como el porcentaje de reducción de los volúmenes de inundación.

Tabla 4.7. Comparación de volúmenes de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con jardines de lluvia.

Periodo de recurrencia (años)	Volumen de inundación (m3) del escenario actual	Volumen de inundación (m3) jardines de lluvia	Porcentaje de reducción del volumen de inundación
2	2201	1908	13%
5	5988	5720	4%
10	9397	9098	3%
25	15218	14863	2%
50	20574	20193	2%

Tabla 4.8. Comparación de volúmenes de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con celdas de bio-retención.

Periodo de recurrencia (años)	Volumen de inundación (m3) del escenario actual	Volumen de inundación (m3) celdas de bio-retención	Porcentaje de reducción del volumen de inundación
2	2201	2072	6%
5	5988	5858	2%
10	9397	9241	2%
25	15218	15032	1%
50	20574	20380	1%

Tabla 4.9. Comparación de volúmenes de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con pavimento permeable.

Periodo de recurrencia (años)	Volumen de inundación (m3) del escenario actual	Volumen de inundación (m3) pavimento permeable	Porcentaje de reducción del volumen de inundación
2	2201	1856	16%
5	5988	5099	15%
10	9397	8147	13%
25	15218	13783	9%
50	20574	19167	7%

El programa SWMM también permite conocer los caudales de inundación y los picos de inundación en las descargas del sistema de alcantarillado pluvial, mediante la presentación de hidrogramas. A continuación, se presentan los hidrogramas del único punto de descarga del sistema de alcantarillado pluvial en el sector de estudio, para el escenario actual (ver Figura 4.21.) y para el “escenario verde” (ver Figura 4.22.) por cada periodo de recurrencia. Así mismo, a fin de determinar cuál infraestructura verde aporta más a la reducción de los picos de inundación, se presenta un hidrograma por cada tipo de infraestructura verde (ver Figura 4.23, Figura 4.24 y Figura 4.25). Los hidrogramas permiten visualizar el comportamiento de los caudales del sistema de alcantarillado pluvial y como estos pueden verse afectados al implementar infraestructuras verdes.

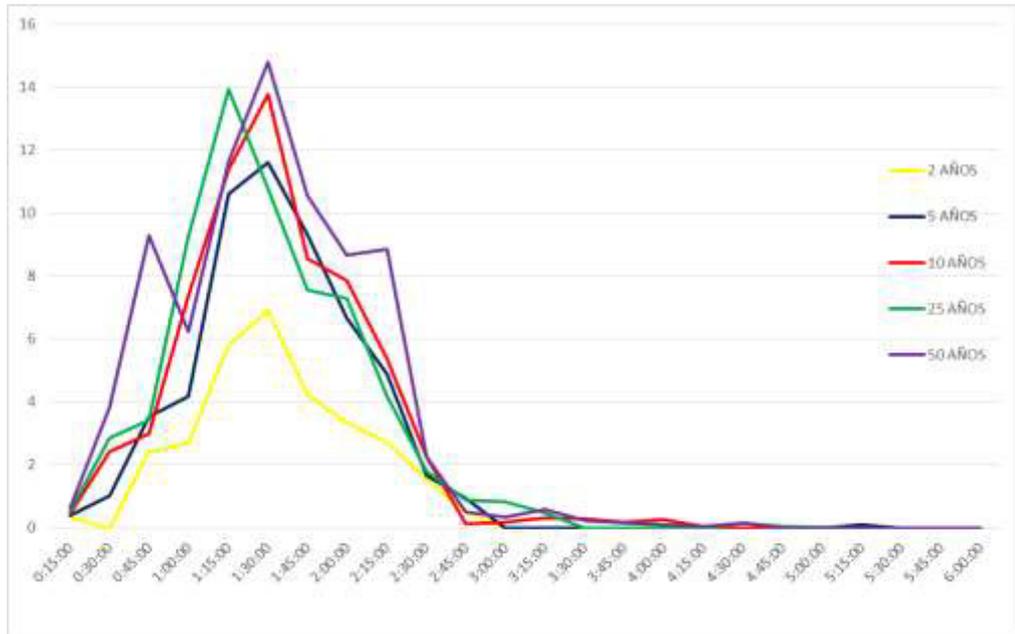


Figura 4.21. Hidrograma de escenario actual para cada periodo de recurrencia.

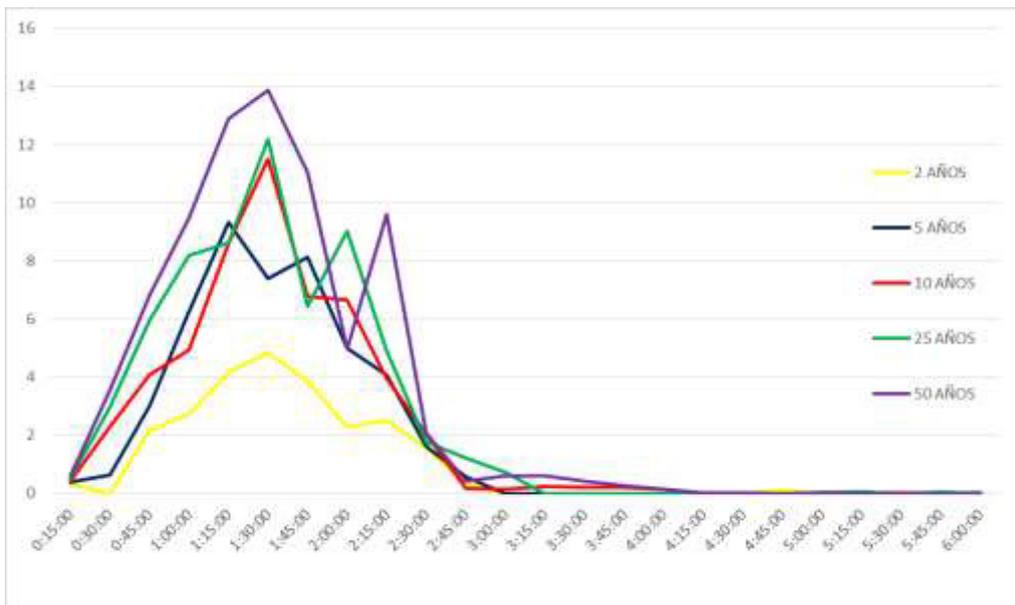


Figura 4.22. Hidrograma de “escenario verde” para cada periodo de recurrencia.

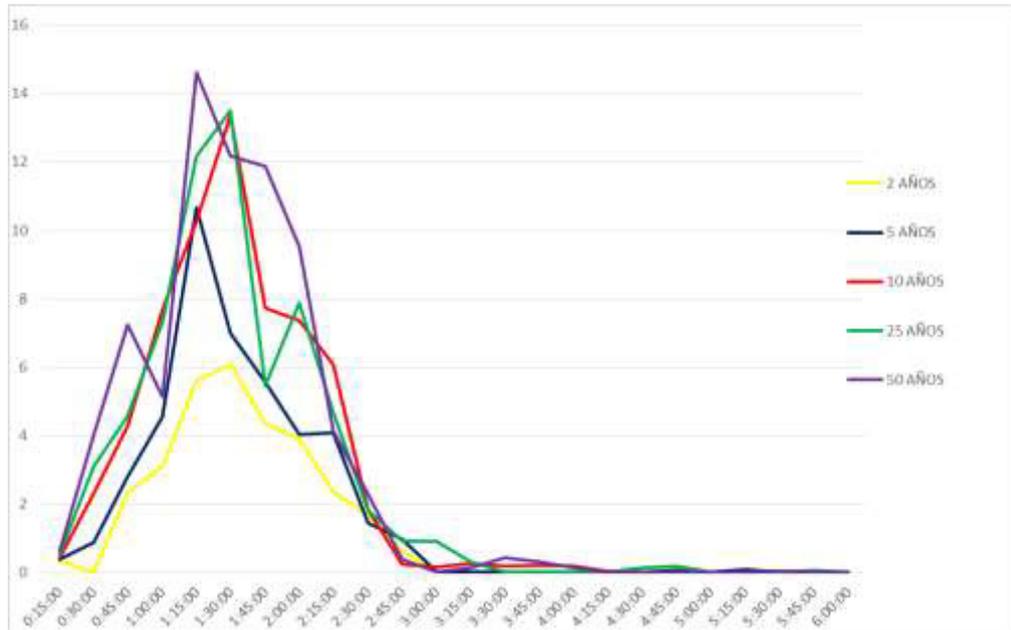


Figura 4.23. Hidrograma de jardín de lluvia para cada periodo de recurrencia.

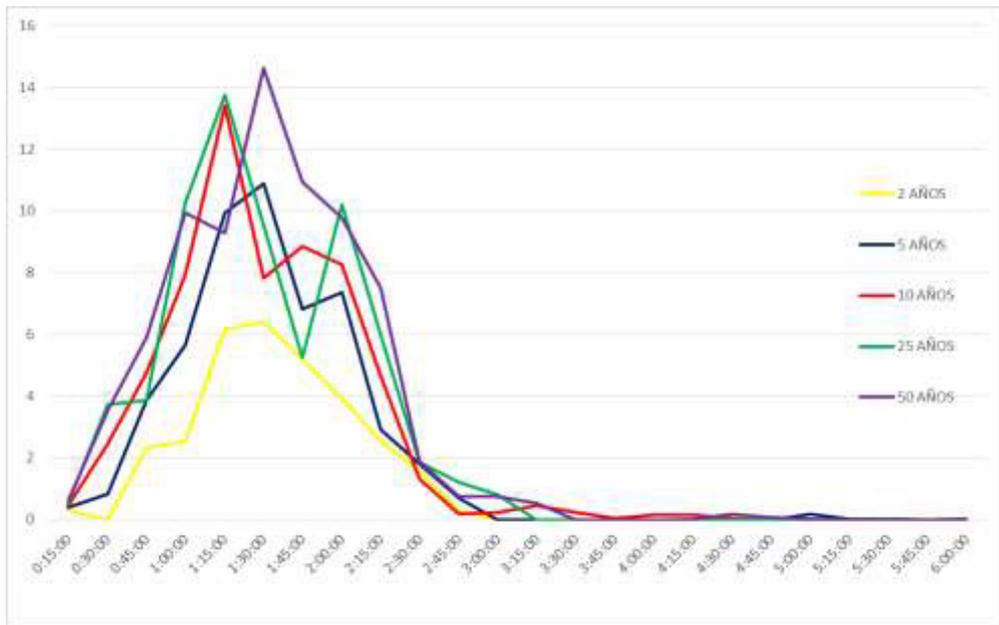


Figura 4.24. Hidrograma de celda de bio-retención para cada periodo de recurrencia.

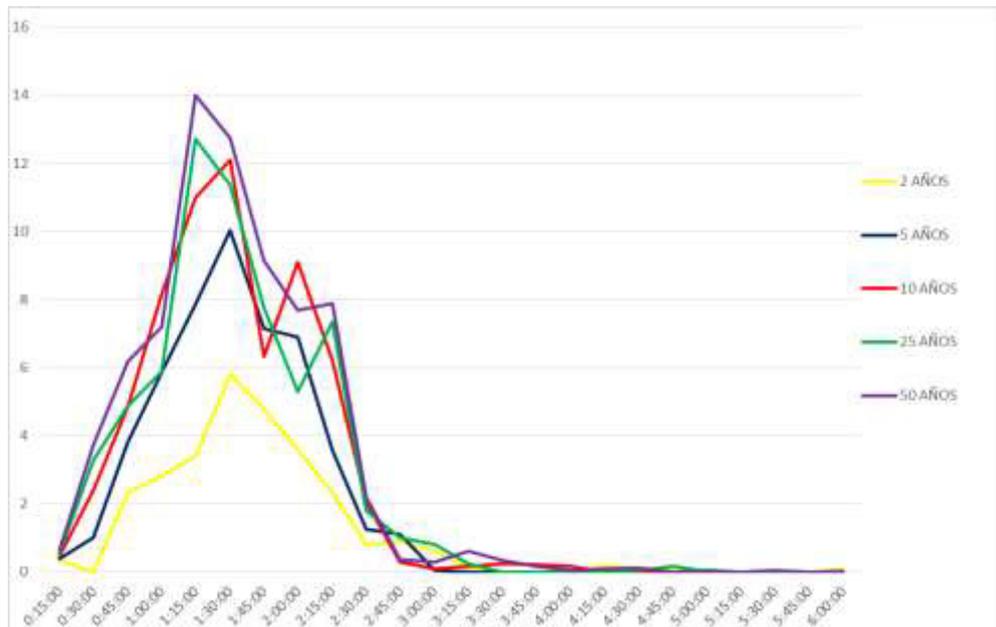


Figura 4.25. Hidrograma de pavimento permeable para cada periodo de recurrencia.

A continuación, en la Tabla 4.10 se presentan los picos de inundación de la descarga del sistema de alcantarillado pluvial, del escenario actual vs. el escenario verde, para cada periodo de recurrencia, así como su respectivo porcentaje de reducción.

Tabla 4.10. Picos de inundación del escenario actual vs. el escenario verde.

Periodo de recurrencia (años)	Picos de inundación (m3/s) del escenario actual	Picos de inundación (m3/s) del escenario verde	Porcentaje de reducción de picos de inundación
2	6.92	4.84	30%
5	11.60	9.33	20%
10	13.76	11.50	16%
25	13.93	12.18	12%
50	14.81	13.87	6%

En la Tabla 4.11 se presenta la comparación de los picos de inundación del escenario actual con los del “escenario verde”, utilizando únicamente jardines de lluvia, así como el porcentaje de reducción de los picos de inundación.

Del mismo modo, en la Tabla 4.12 se presenta la comparación de los picos de inundación del escenario actual con los del “escenario verde”, utilizando únicamente cerdas de bio-retención, así como el porcentaje de reducción de los picos de inundación.

Finalmente, en la Tabla 4.13 se presenta la comparación de los picos de inundación del escenario actual con los del “escenario verde”, utilizando únicamente pavimento permeable, así como el porcentaje de reducción de los picos de inundación.

Tabla 4.11. Comparación de picos de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con jardines de lluvia.

Periodo de recurrencia (años)	Picos de inundación (m ³ /s) del escenario actual	Picos de inundación (m ³ /s) jardines de lluvia	Porcentaje de reducción de picos de inundación
2	6.92	6.07	12%
5	11.60	10.66	8%
10	13.76	13.35	3%
25	13.93	13.51	3%
50	14.81	14.62	1%

Tabla 4.12. Comparación de picos de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con celdas de bio-retención.

Periodo de recurrencia (años)	Picos de inundación (m3/s) del escenario actual	Picos de inundación (m3/s) celdas de bio-retención	Porcentaje de reducción de picos de inundación
2	6.92	6.41	7%
5	11.60	10.88	6%
10	13.76	13.40	3%
25	13.93	13.77	1%
50	14.81	14.64	1%

Tabla 4.13. Comparación de picos de inundación entre el escenario actual y el “escenario verde” sólo con pavimento permeable.

Periodo de recurrencia (años)	Picos de inundación (m3/s) del escenario actual	Picos de inundación (m3/s) pavimento permeable	Porcentaje de reducción de picos de inundación
2	6.92	5.80	16%
5	11.60	10.03	13%
10	13.76	12.10	12%
25	13.93	12.71	9%
50	14.81	13.99	5%

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

A pesar del poco espacio disponible para la implementación de infraestructura verde urbana, 4.58 ha de las 48.95 ha que conforman la 5ta. Etapa de la Ciudadela El Recreo, la reducción de los volúmenes de inundación es significativa, entre el 32% al 7%. Esta variación en los porcentajes de reducción se da, debido a la diferencia en los volúmenes de lluvia con los que deben de trabajar las infraestructuras verdes. Los volúmenes de lluvia aumentan a mayor periodo de recurrencia, lo cual reduce la eficiencia de las infraestructuras verdes, por tal motivo bajo la lluvia de diseño con 2 años de periodo de recurrencia se obtuvo 32% de reducción de volúmenes de inundación, mientras que, bajo la lluvia de diseño con 50 años de periodo de recurrencia se obtuvo 7% de reducción de volúmenes de inundación.

De manera individual, podemos observar que el pavimento permeable es la infraestructura más eficiente, puesto que a pesar de ocupar menos espacio que las otras dos infraestructuras (1.34 ha), logra mayores porcentajes de reducción de volúmenes de inundación, entre el 16% al 7%. En contraste, la celda de bio-retención es la infraestructura menos eficiente, puesto que es la que ocupa mayor espacio (1.81 ha) y alcanza menores porcentajes de reducción, entre el 6% al 1%. Finalmente, el jardín de lluvia ocupa 1.43 ha de espacio y logra porcentajes de reducción entre el 13% al 2%.

Cabe destacar que a pesar de que tanto la celda de bio-retención, como el jardín de lluvia, son menos eficientes en cuanto a la reducción de volúmenes de inundación, su implementación presenta otros beneficios o servicios ecosistémicos para la ciudadanía como: regulación de temperatura, regulación de calidad de aire, recreación, belleza escénica, entre otros. Por tal motivo, es importante considerar la implementación de estos tipos de infraestructura verde, por tener características multifuncionales. Los beneficios ecológicos y sociales, además de los hidrológicos,

siempre se deben de tener presentes al momento de seleccionar el tipo de infraestructura verde.

En el presente trabajo, se optó por aprovechar únicamente el espacio público disponible (parques, parterres, áreas verdes y parqueos), de tal manera que el “escenario verde” sea lo más apegado posible a la realidad del sector de estudio. Este es un escenario conservador, puesto que por ejemplo se pudiera haber optado por modelar la implementación de techos verdes en las viviendas del sector de estudio, con lo que seguramente se hubieran conseguido mejores resultados en cuanto a reducción de volúmenes de inundación, sin embargo en la práctica es inviable, ya que las edificaciones no tienen las instalaciones necesarias para acoger dicha infraestructura. La idea es demostrar que aún bajo un escenario conservador, la implementación de infraestructura verde es una alternativa viable, de tal manera que se pueda transformarse en una propuesta real para el Municipio de Durán.

Por medio de hidrogramas, fue posible evidenciar la reducción en los picos de inundación en la descarga del sistema de alcantarillado pluvial, con valores entre el 30% al 6%. Al igual que la variación de los volúmenes de inundación, el porcentaje de reducción de picos de inundación depende de los volúmenes de lluvia, los cuales aumentan a mayor periodo de recurrencia, motivo por el cual bajo la lluvia de diseño con 2 años de periodo de recurrencia se obtuvo 30% de reducción del pico de inundación, mientras que, bajo la lluvia de diseño con 50 años de periodo de recurrencia se obtuvo 6% de reducción del pico de inundación.

De igual manera a lo ocurrido con los volúmenes de inundación, individualmente se aprecia que el pavimento permeable logra mayores porcentajes de reducción de picos de inundación, entre el 16% al 5%. En contraste, la celda de bio-retención es la infraestructura que alcanza menores porcentajes de reducción, entre el 7% al 1%. Finalmente, el jardín de lluvia logra porcentajes de reducción entre el 12% al 1%.

Es importante tener en cuenta que el espacio disponible, la ubicación geográfica, la topografía, los niveles de inundación, la intensidad de las lluvias, la capacidad de infiltración y drenaje según el nivel freático, entre otros parámetros, van a influir en el rendimiento de las infraestructuras verdes. Por lo tanto, un mismo tipo de infraestructura, con un diseño similar, tendrá un desempeño y resultados diferentes, dependiendo del sector de estudio y las características propias mismo.

Lo expresado en el párrafo anterior, se sustenta en los resultados obtenidos por diferentes investigadores alrededor del mundo, resumidos en la Sección II.11 del presente trabajo, quienes han realizado modelaciones de implementación de infraestructura verde urbana con el programa SWMM, a fin de establecer su efectividad como alternativa para el control de inundaciones. En todos los casos, se obtuvo porcentajes significativos de reducción de volúmenes de inundación, sin embargo, los resultados son difícilmente comparables, puesto que como ya se mencionó, en locaciones diferentes y bajo condiciones distintas, el desenvolvimiento de las infraestructuras verdes varía.

Uno de los estudios más parecidos al presente trabajo, es el de Zahmatkesh, et al (2015), “Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: Case Study of New York City”, en el que se evaluó el rendimiento de barriles de lluvia, pavimento permeable y celdas de bio-retención en la ciudad de Nueva York, Estados Unidos. La lluvia de diseño utilizada prestó los mismos periodos de recurrencia del presente trabajo y obtuvieron porcentajes de reducción de volúmenes de inundación entre el 28% (para 2 años de periodo de recurrencia) y el 14% (para 50 años de periodo de recurrencia). Estos resultados, respaldan los obtenidos por el presente trabajo, al ser un estudio con ciertas características similares (periodos de recurrencia y tipos de infraestructura verde) y resultados cercanos (28% vs. 32% para 2 años de periodo de recurrencia y 14% vs. 7% para 50 años de periodo de recurrencia).

El presente trabajo se diferencia de los mencionados en la Sección II.11, en cuanto a la selección tanto del área de estudio como de la infraestructura verde a modelar. En base a parámetros preestablecidos, se logró determinar el sector idóneo dentro de una ciudad, para la implementación de la infraestructura verde, de una lista larga de potenciales sectores fue posible obtener una lista corta y escoger aquel que cumplía con todos los parámetros requeridos. Una vez seleccionado el sector de estudio y en base a las características propias del lugar, se eligió aquellas infraestructuras cuya implementación fuera más viable. El objetivo de estos pasos previos a la modelación es que los resultados obtenidos fueran lo más apegados a la realidad del sector de estudio, de tal forma que pueda convertirse en un insumo para planificación urbana del lugar y de toda la ciudad.

El presente trabajo también presentó limitaciones, debido a que no fue posible realizar la calibración y validación del modelo propuesto, ya que por las restricciones de movilidad producto del COVID-19, no se pudo realizar mediciones en campo de la topografía del sector, los caudales en el sistema de alcantarillado pluvial, el nivel del agua en la descarga, la intensidad de la lluvia, entre otros. Dicha información se obtuvo de estimaciones, base de datos del Municipio de Durán y recomendaciones bibliográficas. El acceso a la información también fue una limitante, puesto que la principal fuente de información para el presente trabajo es el Municipio de Durán, el cual no presenta sus datos centralizados, sino que se encuentran dispersos entre los diferentes Departamentos o Empresas Públicas adscritas y en diferentes formatos o presentaciones, lo que complicó la recolección y procesamiento de la información.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

El programa de modelación SWMM, ha demostrado ser una herramienta versátil y sencilla de utilizar, con capacidad de simular diferentes escenarios, a fin de conocer la efectividad de implementación de distintas infraestructuras verdes urbanas. Estas características son de suma importancia, ya que permiten ayudar a planificadores y líderes urbanos a tomar mejores decisiones a corto, mediano y largo plazo, en base a simulaciones de posibles eventos futuros.

El programa SWMM fue usado exitosamente, para demostrar que por medio de la aplicación de infraestructuras verdes se alcanza una reducción en los volúmenes de inundación en la ciudad de Durán. Sin embargo, el mayor inconveniente se centra en falta de datos medidos para una calibración y validación real del modelo en el sector de estudio. Esto conlleva a que no se hayan obtenido resultados altamente confiables.

La presente propuesta podría ser tomada por el Municipio de Durán, como punto de partida para el desarrollo de estudios de factibilidad e implementación de infraestructuras verdes urbanas en la ciudad de Durán, como medida de reducción del riesgo ante inundaciones. No obstante, el Municipio de Durán debería llevar a cabo mediciones en campo de la topografía del sector, los caudales en el sistema de alcantarillado pluvial, el nivel del agua en la descarga y la intensidad de la lluvia, para obtener la calibración y validación del modelo propuesto, a fin de lograr resultados más confiables.

La implementación de infraestructura verde urbana sí es una alternativa viable para mitigar el impacto de las inundaciones en la ciudad de Durán, puesto que a pesar de que el sector de estudio cuenta con poco espacio público disponible y presenta alto riesgo de inundación, el modelado indica una reducción de volúmenes de inundación

de hasta un 32% en ese sector. En otros sectores de la ciudad que presentan condiciones más favorables, se estima una reducción mayor de los volúmenes de inundación, debido a la aplicación de las infraestructuras verdes.

La implementación de infraestructuras verdes urbanas en la ciudad de Durán beneficiaría a toda su población, debido a que además de mejorar las condiciones hidráulicas/hidrológicas del sistema de alcantarillado pluvial, al tener características multifuncionales puede promover las condiciones ecológicas y sociales del entorno al regular la temperatura ambiente, reducir la contaminación del aire, reducir el ruido ambiente, mejorar la calidad del agua, mejorar el paisaje, incentivar la recreación e integración social, es decir mejorar la calidad de vida de los habitantes.

Es necesario incluir dentro de la planificación urbana de las ciudades ecuatorianas medidas verdes que reduzcan el impacto de las inundaciones a causa de fenómenos climáticos extremos, sin embargo, los tomadores de decisiones a nivel urbano del país no conocen los beneficios de su implementación, por lo que trabajos como el presente pueden ayudar a cambiar el paradigma del uso de infraestructuras grises o de impermeabilización del suelo por infraestructuras verdes, ya que queda demostrada su efectividad en el control de inundaciones.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos. (2017). *Guía del usuario para modelación SWMM*. Estados Unidos.
- Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos. (2020). *Storm Water Management Model (SWMM)*. Recuperado de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Agencia Nacional del Agua de Singapur. (2018). *ABC Waters Design Guidelines*. Singapur.
- Agencia Nacional del Agua de Singapur. (2016). *Active, Beautiful, Clean Waters Programme*. Singapur.
- Agencia Nacional del Agua de Singapur. (2014). *Engineering Procedures for ABC Waters Design Features*. Singapur.
- Autoridad de Conservación de Toronto. (2010). *Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide*. Canadá.
- Banco Mundial. (2019). *Poblacion urbana (% del total)*. Recuperado de <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2018&start=1960&view=chart>
- Calaza, P. (2019). *Guía de la Infraestructura Verde Municipal*. España: ASEJA, FEMP, AEPJP,.
- Cantó, T. (2014). *La planificación y gestión de la infraestructura verde en la comunidad valenciana*. Revista Aragonesa de Administración Pública (43-44), 215-234.
- Centro de Estudios Ambientales del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. (2014). *La infraestructura verde urbana de Vitoria-Gasteiz*. España: Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz.
- Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. (2013). *Army Low Impact Development Technical User Guide*. Estados Unidos.

- Del Pozo, C. (2016). *Renaturalización de las ciudades, infraestructuras verdes urbanas y resiliencia: Buenas Prácticas*. España: Universidad Rey Juan Carlos.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (1998). *Restauración de corrientes: Principios, procesos y prácticas*. Estados Unidos: USDA.
- Dreiseitl, H. (2013). *El tesoro azul como infraestructura dinámica*. Países: revista de paisajismo, 6-13.
- Eguía, S., & Baxendale, C. (2019). "Infraestructura verde": concepto y enfoque integrados en la práctica del ordenamiento territorial. *Fronteras* (17), 25-32.
- Elliott, A., & Trowsdale, S. (2007). *A review of models for low impact urban stormwater drainage*. *Environmental Modelling & Software*, 22(3), 394–405.
- Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Durán. (2019). *Informe de cobertura de servicios básicos*. Ecuador.
- FAO. (2020). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. Recuperado de <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/#:~:text=Los%20servicios%20ecosist%C3%A9micos%20son%20la,que%20estos%20presten%20sus%20servicios>.
- Fundación Ecológica Proyecta Verde. (2019). *Guía de Instalación de Techos, Paredes y Fachadas Verdes "Guayaquil Cielo Florido"*. Ecuador.
- Fundación Humedales. (2019). *Infraestructura Azul-Verde para la Adaptación al Cambio Climático: Combinando la naturaleza y estructuras semi-naturales para la gestión del agua y reducción de riesgos en las cuencas peruanas*. Recuperado de <https://lac.wetlands.org/blog/infraestructura-azul-verde-para-la-adaptacion-al-cambio-climatico-combinando-la-naturaleza-y-estructuras-semi-naturales-para-la-gestion-del-agua-y-reduccion-de-riesgos-en-las-cuencas-peruanas/>
- Gil, P., Forner, A., & Valladares, F. (2017). *Bases científico-técnicas para a estrategia estatal de infraestructura verde y de la conectividad y restauración ecológica*. Madrid, España: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Hans, G. (2016). *El diseño de la infraestructura verde y azul para apoyar la vida urbana saludable*. TO Federatie.
- INTERAGUA (2015). *Manual de diseño de redes de Alcantarillado*. Guayaquil, Ecuador.

- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2019). *Población y Demografía*. Recuperado de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2019). *Red de estaciones meteorológicas e hidrológicas*. Recuperado de <https://inamhi.wixsite.com/inamhi/novedades>
- Jayasooriya, V. M., & Ng, A. W. M. (2014). *Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices: a Review*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225 (8).
- Kaykhosravi, S., Khan, U., & Jadidi, A. (2018). *A Comprehensive Review of Low Impact Development Models for Research, Conceptual, Preliminary and Detailed Design Applications*. *Water*, 10 (11), 1541.
- Lluisupa, X. & Zhagui, L. (2016). *Diseño urbano-arquitectónico. Infraestructura verde en la parroquia Sinincay del cantón Cuenca*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Melbourne Water. (2005). *Water Sensitive Urban Design Engineering Procedures*. Australia.
- Núñez, A. (2019). *Saneamiento óptimo: Foco en las Américas durante la Semana Mundial del Agua 2019*. Recuperado de <https://blogs.iadb.org/agua/es/saneamiento-optimo-foco-en-las-americas-durante-la-semana-mundial-del-agua-2019/>
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Plett, V. (2019). *Sustainable Urban Drainage Systems for Durán City, Ecuador*. Universidad de Ciencias Aplicadas Magdeburg-Stendal, Alemania.
- Proyecto See Urban Water. (2019). *Cuarto boletín informativo*. Alemania: Universidad Tecnológica de Darmstadt.
- Proyecto RESCLIMA. (2019). *Metodología, Análisis y Resultados de Vulnerabilidad, amenaza, riesgos, multiamenaza y riesgos múltiples*. Ecuador: ESPOL.
- Rangari, V., Patel, A., & Umamahesh, N. (2015). *Review of Urban stormwater Models*. Water & Environment Division, National Institute of Technology, India.
- Rodríguez, L. (2019). *Infraestructura azul en el sur de Madrid*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

- Rossman, L. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Cincinnati OH: United States Environmental Protection Agency.
- Shrivastava, P. (2016). *Urban water hydrological modelling*. Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Raipur.
- Sousa, R. (2018). *Incorporating wetlands in hydrologic and hydraulic models for flood zone delineation: An application to Durán, Ecuador*. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 28 (2018) 375–383.
- Universidad Tecnológica de Darmstadt. (2019). *Infraestructuras verdes para la resiliencia urbana*. Darmstadt, Alemania.
- Valdés, P., & Foulkes, M. D. (2016). *La infraestructura verde y su papel en el desarrollo regional, aplicación a los ejes recreativos y culturales de resistencia y su área metropolitana*. *Cuaderno Urbano. Espacio, cultura y sociedad*, 20 (20), 45-70.
- Vásquez, A. (2016). *Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile*. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63, 63-86.
- Vente Chow, Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1994). *Hidrología aplicada*. Mc Graw Hill
- Victoria State Government. (2017). *Planning a Green-Blue City*. E2Designlab.
- Zoppou, C. (2001). *Review of urban storm water models*. *Environmental Modelling & Software*, 16 (3), 195–231