

 Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña - Colombia Virgilio Hincapié	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 08-07-2021	Fecha B
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO	Pág. 1(2)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Diana Marcela Navarro Mora Cristian Andrés Carrascal Carrascal		
FACULTAD	Facultad de Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	María Angélica Álvarez Bayona		
TÍTULO DE LA TESIS	Tratamiento de aguas pluviales mediante la utilización de techos verdes y su aplicación para sistemas de riego		
TITULO EN INGLES	Rainwater treatment through the use of green roofs and their application for irrigation systems		
RESUMEN			
En la actual monografía de compilación se estudian diferentes casos a nivel Internacional y Nacional en los que se implementaron los techos verdes con el propósito de conocer los múltiples beneficios que estos brindan, en especial, cómo ayudan a mitigar la escorrentía y mejorar la calidad del agua, para que de esta manera pueda ser reutilizada en sistemas de riego. Además, se realizó un modelo en el programa Epa Swmn tomando como referencia una zona propensa a inundaciones frecuentes con el fin de observar el comportamiento del caudal de salida al utilizar techos verdes en áreas residenciales y comerciales.			
RESUMEN EN INGLES			
In the current compilation monograph, different international and national cases in which green roofs were implemented are studied in order to learn about the multiple benefits they provide, especially how they help to mitigate runoff and improve water quality, so that it can be reused in irrigation systems. In addition, a model was made in the Epa Swmn program taking as a reference an area prone to frequent flooding in order to observe the behavior of the outflow when using green roofs in residential and commercial areas.			
PALABRAS CLAVES	Techos verdes, Escorrentía, Sistemas de riego, Tratamiento de aguas pluviales, Infraestructuras verdes, Captación de agua lluvia		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Green roofs, Runoff, Irrigation systems, Rainwater treatment, Green infrastructures, Rainwater harvesting		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 132	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES:41	CD-ROM:

**Tratamiento de aguas pluviales mediante la utilización de techos verdes y su
aplicación para sistemas de riego**

Diana Marcela Navarro Mora

Cristian Andrés Carrascal Carrascal

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería civil

MGS. María Angelica Álvarez Bayona

23 de enero del 2024

Nota

El Comité Curricular del Plan de Estudios de Ingeniería Civil, según consta en el Acta No. 0015 de fecha 20 de abril de 2023, acordó asignar como jurados de la presente monografía a los docentes Susana María Plata Jiménez y María Alejandra Vergel Bermúdez.

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la oportunidad de culminar este periodo de estudios, que es el inicio de una nueva etapa en mi vida.

A mis padres, abuelos, hermano y mi familia por ser ese motor que me impulsa a salir adelante cada día, por estar para mí siempre que los necesito, por apoyarme y brindarme una palabra de aliento en los momentos de frustración, pero también por celebrar conmigo cada logro.

A mis amigos, por compartir conmigo horas de estudio, los momentos de estrés y los momentos de risas, sin duda alguna han sido parte fundamental en este proceso.

Diana Marcela Navarro Mora

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres que me han formado con buenos principios y valores, gracias a su esfuerzo y dedicación, por aconsejarme en los momentos difíciles y siempre guiarme por el buen camino me ha permitido ser la persona que soy hoy en día.

A mis hermanos por ser mi motivación para seguir adelante y poder ser un ejemplo a seguir para ellos.

A mis amigos que han confiado en mí y con quienes he crecido tanto intelectualmente y como persona.

Cristian Andrés Carrascal Carrascal

Agradecimientos

A nuestra directora MGS. María Angélica Álvarez Bayona, por la entrega y dedicación de este trabajo, su apoyo y colaboración continua durante todo el transcurso de la investigación.

A todos los profesores que hicieron parte del proceso ya que su apoyo y guía han sido invaluable en este proceso, por compartir sus conocimientos y ayudarnos a desarrollar nuestro potencial.

Finalmente agradecemos a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, por brindarnos la oportunidad de crecer académicamente y por facilitarnos los conocimientos y herramientas necesarias para la culminación de nuestro pregrado.

Diana Marcera Navarro Mora

Cristian Andres Carrascal Carrascal

Índice

Introducción	14
Capítulo 1. Conceptos hidráulicos y generalidades de los techos verdes.	17
1.1 Conceptos hidráulicos.....	17
1.1.1 Hidráulica.....	17
1.1.2 Fluido.	17
1.1.3 Presión.....	18
1.1.4 Caudal.	18
1.1.5 Viscosidad.....	18
1.1.6 Infiltración.....	19
1.1.7 Filtración.	19
1.1.8 Filtro de arena.	19
1.1.9 Drenaje pluvial.....	19
1.1.10 Captación de agua lluvia de techos.	20
1.1.11 Sistemas Urbanos de drenaje sostenible (SUDS).	20
1.1.12 Sistema de riego.	20
1.1.13 Escorrentía.	21
1.1.14 Caudal de escorrentía.	21
1.1.15 Tratamiento biológico para aguas residuales:.....	21
1.1.16 Infraestructuras verdes.	21
1.2 Generalidades.....	22
1.3 Análisis bibliométrico.....	27
1.4 Análisis crítico	37
Capítulo 2. Estudios sostenibles a nivel internacional que emplearon techos verdes.	39
2.1 Casos de estudio.....	39
2.1.1 América del Norte.....	39
2.1.2 Latinoamérica.	41
2.1.3 Europa.	42
2.1.4 Asia	49
2.1.5 Oceanía.	54
2.1.6 Cuadro Resumen.....	55

2.2 Lineamientos y regulaciones internacionales	56
2.2.1 Directrices y normas en Europa	56
2.2.2 Directrices y normas en Norteamérica.....	57
2.2.3 Directrices y normas en Asia	59
2.2.4 Lineamientos y regulaciones en Oceanía.....	63
2.2.5 Lineamientos y regulaciones en Latinoamérica.....	63
2.3 Análisis crítico.	64
Capítulo 3. Estudios sostenibles a nivel nacional que emplearon techos verdes.....	66
3.1 Casos de investigación.....	66
3.1.1 Caso de Bogotá.	66
3.1.2 Caso de Bogotá, localidad: Chapinero.....	67
3.1.3 Caso de Bogotá, localidad: Fontibón.	68
3.2 Lineamientos y regulaciones en Colombia	70
3.2.1 Guía de techos verdes de Colombia.....	70
3.3 Cuadro Resumen	71
3.4 Análisis crítico.	72
Capítulo 4: Análisis del agua pluvial tratada para sistema de riego.	73
4.1 Calidad del agua para sistemas de riego	74
4.2 Parámetros de calidad del agua para riego.....	74
4.3 Estado del arte sobre los sistemas de riego.....	78
4.4 Historia de los sistemas de riego.....	78
4.5 Clasificación de los sistemas de riego	79
4.6 Calidad del agua de los techos verdes: Una revisión.....	81
4.7 Almacenamiento en cisterna como forma de tratamiento de aguas pluviales	81
4.8 Factores que afectan la calidad del agua de la escorrentía de los techos verdes y el transporte de contaminantes.....	83
4.8.1 Fósforo	84
4.8.2 Nitrógeno	85
4.8.3 Metales pesados	86
4.8.4 pH.....	87
4.8.5 Primer lavado	87

4.8.6 Relación entre la fertilización, la contaminación por escorrentía y el desarrollo de la vegetación.....	88
4.9 Normativa colombiana.....	89
4.10 Análisis crítico	90
Capítulo 5. Modelación en el software Epa Swmn.....	92
5.1 Localización zona de estudio	92
5.2 Información general de la cuenca	92
5.2.1 Áreas de la subcuenca	93
5.2.2 Clasificación de cuencas	93
5.2.3 Longitud del cauce	93
5.2.4 Ancho de las subcuencas	94
5.2.5 Pendiente media del cauce	94
5.2.6 Hietogramas de la cuenca con el método de bloques alternos.....	96
5.3 Información ingresada a Epa Swmn	104
5.3.1 Rain gages.....	104
5.3.2 Subcatchments	105
5.3.3 Nodos (Juntion y Outfall)	106
5.3.4 Conduit.....	107
5.3.5 Hidrogramas de las subcuencas para cada periodo de retorno sin utilizar SUDS.	108
5.3.6 Hidrogramas de las subcuencas para cada periodo de retorno utilizando SUDS.	111
Capítulo 6. Síntesis crítica	115
Conclusiones	122
Referencias.....	124

Lista de tablas

Tabla 1 Artículos mas citados sobre techos verdes	36
Tabla 2 Descripción general de los escenarios que se consideran.....	45
Tabla 3 Tabla 3 Cambios porcentuales en la profundidad promedio de inundación (AFD) ..	46
Tabla 4 Cuadro resumen	55
Tabla 5 Tabla resumen.....	71
Tabla 6 Criterios de calidad para uso agrícola.....	89
Tabla 7 Distribución del área por subcuencas	93
Tabla 8 Clasificación cuencas.....	93
Tabla 9 Longitud del cauce distribuido por subcuencas.....	94
Tabla 10 Ancho de las subcuencas	94
Tabla 11 Pendiente media de las subcuencas	95
Tabla 12 Intensidad.....	96
Tabla 13 TR (años)	96
Tabla 14 Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 2 años, por el método de bloques alternos	97
Tabla 15 Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 5 años, por el método de bloques alternos	98
Tabla 16 Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 10 años, por el método de bloques alternos	99
Tabla 17 Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 25 años, por el método de bloques alternos	101
Tabla 18 Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 50 años, por el método de bloques alternos	102

Tabla 19 Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 100 años, por el método de bloques alternos	103
--	-----

Lista de figuras

Figura 1 Cubiertas verdes sostenibles	26
Figura 2 Tipos de documentos científicos	27
Figura 3 Producción científica anual	28
Figura 4 Nube de palabras	29
Figura 5 Tres campos.....	30
Figura 6 Frecuencia de las palabras claves	31
Figura 7 Palabras claves por importancia	31
Figura 8 Iteración entre palabras claves.....	32
Figura 9 Instrucciones más relevantes	33
Figura 10 Citaciones por país	34
Figura 11 Colaboraciones entre países	35
Figura 12 Evolución de los autores a lo largo de los años.....	35
Figura 13 Cuenca Barrio San Antonio.....	92
Figura 14 Curva IDF	95
Figura 15 Ventana Rain Gage.....	104
Figura 16 Ventana Subcatchments.....	105
Figura 17 Ventana Juntion.....	106
Figura 18 Ventana Outfall.	106
Figura 19 Ventana Conduit.....	107
Figura 20 Ventana Cross section editor.	107
Figura 21 Modelo Epa Swmn.	108
Figura 22 Caudales de las subcuencas con un $T = 2$ años (sin aplicar SUDS).....	108

Figura 23 Caudales de las subcuencas con un T = 5 años (sin aplicar SUDS).....	109
Figura 24 Caudales de las subcuencas con un T = 10 años (sin aplicar SUDS).....	109
Figura 25 Caudales de las subcuencas con un T = 25 años (sin aplicar SUDS).....	110
Figura 26 Caudales de las subcuencas con un T = 50 años (sin aplicar SUDS).....	110
Figura 27 Caudales de las subcuencas con un T = 100 años (sin aplicar SUDS).....	111
Figura 28 Caudales de las subcuencas con un T = 2 años (aplicando SUDS).....	111
Figura 29 Caudales de las subcuencas con un T = 5 años (aplicando SUDS).....	112
Figura 30 Caudales de las subcuencas con un T = 10 años (aplicando SUDS).....	112
Figura 31 Caudales de las subcuencas con un T = 25 años (aplicando SUDS).....	113
Figura 32 Caudales de las subcuencas con un T = 50 años (aplicando SUDS).....	113
Figura 33 Caudales de las subcuencas con un T = 100 años (aplicando SUDS).....	114
Figura 34 Áreas de las subcuencas	115
Figura 35 Resultados.....	116
Figura 36 Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=2años).....	117
Figura 37 Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=5años).....	117
Figura 38 Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=10años).....	118
Figura 39 Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=25años).....	118
Figura 40 Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=50años).....	119

Figura 41 Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=100años).....	119
--	-----

Introducción

Como consecuencia del rápido crecimiento económico, muchos países a nivel mundial han experimentado un crecimiento de la urbanización (Vijayaraghavan, 2015). A partir de esto, surge la problemática del manejo de aguas lluvias, debido a que se construyen más áreas impermeables y hay una constante renovación de sistemas de drenaje que hacen posible la vida en la modernidad (Suavita, 2014). El crecimiento de la población en las ciudades se relaciona con el aumento de áreas impermeables y con cambios en los flujos de materia y energía. Estos cambios del uso del suelo conllevan a un cambio del flujo de materia y energía en el ciclo hidrológico donde los cambios de infiltración y de evaporación disminuyen de forma drástica, lo cual modifica los tiempos de concentración, y esto a su vez provoca un crecimiento en la escorrentía superficial. Este aumento de volumen y caudal de aguas lluvia genera mayor transporte de sedimentos y contaminantes, y a largo plazo se puede tener un impacto negativo en los ecosistemas relacionados (Suavita, 2014).

En la actualidad, se implementan técnicas estructurales y no estructurales que permiten un mejor drenaje de aguas lluvias (Molano, 2016). Dentro de estas nuevas técnicas se encuentran las SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems), las cuales surgen como solución para mitigar los riesgos de inundación y para mejorar la calidad tanto en aguas arriba como en aguas abajo en las cuencas urbanizadas (Niemczynowicz, 1999). Los nuevos métodos de manejo y tratamiento de aguas pluviales se basan en tecnologías ambientalmente racionales a pequeña escala que involucran sistemas biológicos naturales o contruidos para tratar las aguas pluviales. A estos

métodos pertenecen: filtros de plantas, humedales, sistemas de zonas de raíces, instalaciones de percolación, entre otros (Niemczynowicz, 1999).

Según la organización Green Roofs for Healthy Cities, los techos verdes se definen como un sistema colocado en el techo de un edificio que funciona como un medio impermeabilizante, de cultivo y plantas (López-González, Camacho, Martínez-Rodríguez, & Marcelino-Aranda, 2020). Los techos verdes se proponen como una tecnología sostenible, pues tienen la capacidad de captar agua de lluvia y de esta manera, reducen el riesgo de inundaciones por empozamiento de aguas pluviales (Contreras-Bejarano & Villegas-González, 2020). El concepto de sostenibilidad es uno de los enfoques fundamentales de esta monografía, pues es la orientación moderna de la gestión del agua.

En los últimos años, la implementación de los techos verdes ha aumentado considerablemente debido a sus efectos de enfriamiento, su habilidad para controlar las aguas pluviales, la estética y los valores paisajísticos que aporta a la urbe. Además, los techos verdes pueden reducir la contaminación de las aguas lluvias mediante la absorción y filtración de contaminantes como es el caso de algunos metales pesados, permiten neutralizar de forma ligera el pH y aportan cargas significativas de hidrógeno (Suavita, 2014).

Ahora bien, en Colombia hay pocas investigaciones que se hayan encargado de hablar sobre el potencial de los techos verdes como método sostenible para tratar las aguas de escorrentía. Por lo tanto, este trabajo pretende estudiar los beneficios hidrológicos y ambientales de los techos verdes, sus ventajas y desventajas de implementación en edificaciones de acuerdo a

investigaciones previas y bibliografía existente sobre la gestión del agua haciendo uso de techos verdes.

Capítulo 1. Conceptos hidráulicos y generalidades de los techos verdes.

En este capítulo se resaltan los conceptos hidráulicos que se requieren para la interpretación de las condiciones del agua pluvial y su tratamiento condicionado a los techos verdes, además se da una introducción al tema en estudio.

1.1 Conceptos hidráulicos.

1.1.1 Hidráulica.

La hidráulica es la aplicación del método integral de la mecánica de fluidos a aquellos problemas de la vida práctica en que intervienen líquidos. Podría decirse que ésta es la rama aplicada de la mecánica de los fluidos incompresibles (Cadavid, 2006).

1.1.2 Fluido.

Un fluido es un tipo de medio continuo que tiene como característica fundamental la fluidez. Es decir, tienen la capacidad de cambiar de forma continuamente cuando está sometido a un esfuerzo cortante. Unos líquidos se mueven más lentos que otros, pero ante un esfuerzo cortante todos se moverán siempre (Mott, 1994).

Los fluidos pueden ser líquidos como el agua, el aceite, la gasolina o la glicerina o gaseosos como el aire, el oxígeno, el nitrógeno o el helio.

1.1.3 Presión.

Se define como la cantidad de fuerza ejercida sobre un área unitaria de una sustancia (Mott, 1994). Según Blaise Pascal, se pueden describir dos principios referentes a la presión:

- La presión actúa uniformemente en todas direcciones sobre un pequeño volumen de un fluido.
- En un fluido confinado entre fronteras sólidas, la presión actúa perpendicularmente a la frontera.

1.1.4 Caudal.

Se define como la cantidad de flujo que circula a través de una sección de ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal, entre otros) medido por unidad de tiempo.

1.1.5 Viscosidad.

En un fluido, es la medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción en un fluido. La viscosidad es una propiedad física que caracteriza a todos los fluidos, y surge cuando las partículas de un fluido colisionan, moviéndose a diferentes velocidades y generando según la teoría cinética una resistencia a su movimiento (Domingo, 1997). La pérdida de energía debida a la fricción de un fluido que fluye se debe a su viscosidad (Mott, 1994).

1.1.6 Infiltración.

En hidrología, la infiltración se define como el proceso por el cual el agua circula a través del perfil del suelo, reponiendo la humedad del suelo, recargando los acuíferos y manteniendo el caudal de los ríos durante periodos de estiaje (Romera & Santos, 2023).

1.1.7 Filtración.

Es una de las prácticas estructurales de los sistemas de drenajes sostenibles en la que se usa una combinación de material granular filtrante como suelo, arena, material orgánico, carbón o membranas para remover contaminantes en el agua de escorrentía (Ávila, 2012).

1.1.8 Filtro de arena.

Los filtros de arena son lechos o camas de material granular o arena, y drenados o escurridos por debajo para que las aguas negras pretratadas puedan ser tratadas, recogidas y distribuidas por el sistema de aplicación al suelo. Estos filtros normalmente se usan para pulir el efluente de tanques sépticos y otros procesos de tratamiento antes de distribuir el agua sobre el suelo (Lesikar & Enciso, 2000).

1.1.9 Drenaje pluvial

Es un sistema de tuberías, colectores e instalaciones complementarias que recolectan agua de escorrentía de precipitaciones pluviales (agua lluvia) para su posterior vertido, y de esta manera, evitar daños materiales y humanos (Cadavid, 2006).

1.1.10 Captación de agua lluvia de techos.

La captación de agua lluvia proveniente de viviendas, establos, galpones, invernaderos y otras construcciones que existen, se destina principalmente al consumo humano y utilización doméstica, debido a sus buenas características de calidad. Los techos debido a su condición impermeable, producen un volumen de escorrentía cercano al volumen de lluvia. De hecho, lo más adecuado es que estén en posición elevada para facilitar la captación y almacenamiento del agua, de esta manera las canaletas colocadas en la parte inferior del plano inclinado recogen la escorrentía del techo, y por una tubería la conducen hacia la estructura de almacenamiento (estanques o cisternas), de donde el agua es retirada para ser utilizada eventualmente (FAO, 2013).

1.1.11 Sistemas Urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

Estos sistemas integran urbanismo, paisajismo e hidrología. Tienen como objetivo dotar a la ciudad de nuevas capas permeables de tejados y pavimentos que se comportan como sumideros filtrantes que emulan el ciclo natural del agua. El agua que se filtra es captada y gestionada de forma subsuperficial para ser reutilizada, infiltrada al terreno o vertida directamente a cauce natural, controlando cantidad, calidad y tiempo (Secretaría de Ambiente de Bogotá, 2023).

1.1.12 Sistema de riego.

El riego agrícola es una de las prácticas más antiguas utilizadas por el hombre para producir sus alimentos. Éste se puede definir como la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos.

Es decir, un riego no se centra en la superficie del suelo, pues es dentro del perfil del suelo donde están las raíces de las plantas (Gurovich, 1985).

1.1.13 Escorrentía.

Es el agua excedente de las precipitaciones (lluvias), que se mueve sobre el suelo o a través del mismo y llega a los cauces superficiales, saliendo por ellos fuera de la cuenca vertiente (Tánago, 2023).

1.1.14 Caudal de escorrentía.

Es la velocidad de salida de la escorrentía por la sección del cauce correspondiente. El caudal depende del volumen de agua y de la sección de paso (Tánago, 2023).

1.1.15 Tratamiento biológico para aguas residuales:

Este proceso se lleva a cabo mediante una serie de importantes etapas de tratamiento que tienen en común el uso de microorganismos para eliminar componentes solubles en el agua. Estas etapas aprovechan la capacidad de los microorganismos de asimilar para su propio crecimiento los restos de materia orgánica y los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que están disueltos en el agua (Arnáiz, Isac, & Lebrato, 2000).

1.1.16 Infraestructuras verdes.

Según la Comisión Europea, la infraestructura verde comprende una red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales de alta calidad con otros elementos medioambientales, diseñada y gestionada para proporcionar un amplio abanico de servicios

ecosistémicos y proteger la biodiversidad tanto de los asentamientos rurales como urbanos. Bajo este concepto, hay una gran cantidad de elementos que hacen parte de este grupo de estructuras como parques, zonas forestales, setos, ríos, humedales, estructuras artificiales como ecoductos, cubiertas verdes, escalas para peces o vías para ciclismo (Mas, Sánchez, & Martín, 2018).

1.2 Generalidades.

El concepto de techo verde tiene su origen en los Jardines Colgantes de Babilonia (el actual Irak). Los romanos destacaron su uso de techos verdes en los monumentos de Augusto y Adriano. Además, los vikingos aislaron sus techos con algas. En los tejados de los zigurats iraníes había jardines, y en los balcones de los pisos superiores de las tiendas de Pompeya había plantas trepadoras (Ur et al., 2013). Los techos verdes consistían en estructuras similares a cuevas o techos de césped cubiertos con tierra y plantas, que se utilizaban habitualmente para la agricultura, la vivienda y con fines ceremoniales. Aunque estas estructuras protegían de la intemperie, aislaban del frío en invierno y protegían del sol en verano, no se ajustaban a los estándares actuales, ya que era improbable que fueran totalmente impermeables y no disponían de sistemas para impedir la entrada de animales salvajes no deseados (Korol & Shushunova, 2016).

A principios de la era moderna, la noción de techo verde fue ampliamente adoptada en numerosas regiones y civilizaciones de numerosos continentes. Una tecnología única fue pionera en el concepto de cubierta viva sobre tejados de hormigón. La primera versión de este techo debutó durante la Exposición Universal de París de 1867. El modelo representa un tejado verde con sistemas de impermeabilización y drenaje y se considera la primera idea de techo verde a

gran escala (Abass et al., 2020). A principios de la década de 1960, las tecnologías de techos verdes se extendían rápidamente por todo el mundo, sobre todo en Suiza y Alemania. Suiza utilizaba este tipo de cubiertas para minimizar el drenaje superficial (Magill et al., 2011).

Los techos verdes son conocidos, tanto en los climas fríos de Islandia, Escandinavia, USA y Canadá, como en los climas cálidos de Tanzania. En las zonas de climas fríos, "calientan", puesto que almacenan el calor de los ambientes interiores y en los climas cálidos "enfrian", ya que mantienen aislados los espacios interiores de las altas temperaturas del exterior (Minke, 2016).

Un techo verde es un techo cubierto con sustrato y vegetación (Blank et al., 2017).

Los techos verdes tienen varias capas de materiales, incluida la capa de vegetación, la capa de sustrato (sustrato de cultivo), la capa de retención de agua, la capa de filtro, la capa de drenaje, la barrera de raíces y la capa de protección (Bozorg Chenani et al., 2015).

La vegetación se planta en el sustrato; por lo tanto, los materiales y nutrientes de la capa de sustrato respaldan el crecimiento y el rendimiento fisiológico de las plantas (Young et al., 2014). Hay cuatro factores que gobiernan la adecuación de un medio de crecimiento: La capacidad de retención del agua, el grado de drenaje, la fertilidad de la vegetación y la densidad de los medios de crecimiento. Las plantas de un techo verde deben ser capaces de vivir en suelos escasos y sobrevivir a la exposición al calor, el frío y viento; así como estar densamente espaciadas. Para elegir las mejores plantas de techo verde se deben tener en cuenta cuatro

factores: Tamaño, durabilidad, propósito y estética, tipo de techo verde. La capa de retención de agua captura las aguas pluviales y reduce la escorrentía de los techos, y también proporciona agua para las plantas (Simmons et al., 2008). La capa de filtro está por encima de la capa de drenaje y evita que las partículas finas del sustrato pasen a través de la capa de drenaje. Al eliminar el exceso de agua a través de su porosidad, la capa de drenaje se encarga de proporcionar un equilibrio entre el drenaje y la retención de agua y una adecuada aireación de las raíces. La capa de protección y la barrera de raíces se colocan en el nivel más bajo de las capas, protegiendo la estructura del edificio de la penetración de raíces de vegetación y partículas de pequeño tamaño en las estructuras (Bozorg Chenani et al., 2015).

Los techos verdes se pueden clasificar en techos intensivos y extensivos en función de su propósito y características. Los techos intensivos tienen sustratos profundos (> 25 cm) y una gran variedad de vegetación que puede incluir arbustos y árboles (Aboelata, 2021) (Manso et al., 2021) y requieren mano de obra calificada, riego y mantenimiento constante. Por lo general, se asocian con jardines en la azotea (Molineux et al., 2009). Los techos extensivos tienen una profundidad media de crecimiento de 5 a 15 cm, la diversidad de plantas es generalmente limitada debido a la poca profundidad del sustrato; sin embargo, estos son el tipo de aplicación más frecuente de los RR.GG. debido a su bajo costo (Shahmohammad et al., 2022), están diseñados para ser prácticamente autosuficientes y requieren un mantenimiento mínimo (Molineux et al., 2009).

Existe un tercer tipo de techos verdes llamados semi-intensivos. El techo verde semi-intensivo es una combinación de extensivo e intensivo, sin embargo, el tipo extensivo debe

representar el 25% o menos del área total del techo verde (Yang et al., 2008), suelen tener profundidades de sustrato de 15 a 25 cm, generalmente acomodan una amplia variedad de tipos de vegetación debido a la profundidad de su sustrato (Shahmohammad et al., 2022).

Varios países de todo el mundo han demostrado la viabilidad de la tecnología de los techos verdes y, posteriormente, los han integrado en la normativa sobre construcción de nuevos edificios.

Los sistemas de cubiertas verdes tienen un desarrollo reciente; sin embargo, hoy en día ya son un mecanismo utilizado a nivel global (Andres Ibañez, 2008) que brindan una solución basada en la naturaleza a desafíos ambientales como el cambio climático y la isla de calor urbana. Los techos verdes ayudan en la conservación de la energía de refrigeración y calefacción; deposición de partículas y mitigación de la contaminación del aire; control de escorrentías y contaminación del agua; promoción de la biodiversidad; y provisión de beneficios estéticos y de salud (Mihalakakou et al., 2023).

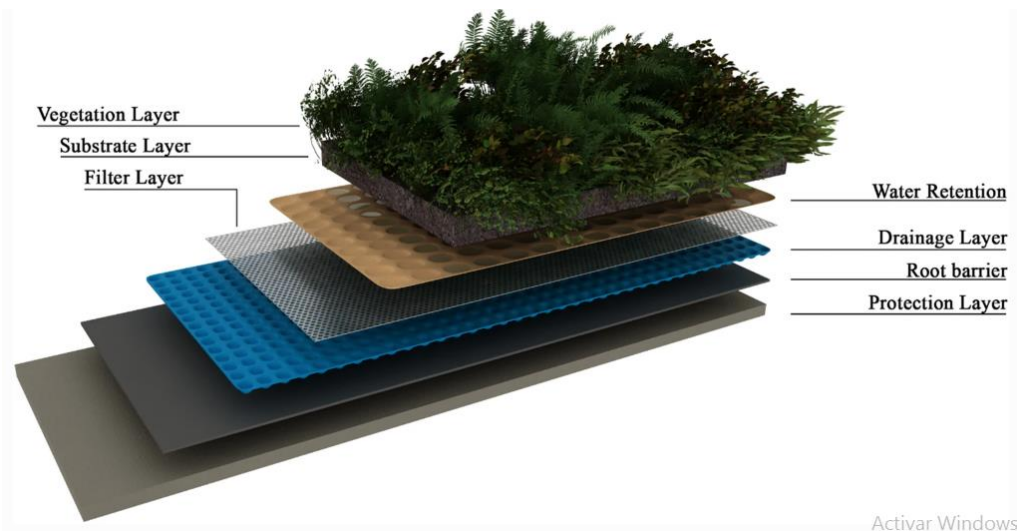
Las luchas actuales con la integración de infraestructuras verdes también se derivan de la falta de prácticas basadas en evidencia para delinear los costos y beneficios económicos, sociales y físicos reales de las implementaciones. Potencialmente, vías y pautas claras pueden facilitar la implementación de proyectos de infraestructura verde y aumentar el capital social junto con el capital financiero y físico en las ciudades (Twohig et al., 2022).

Para lograr condiciones de vida favorables en entornos urbanos, es necesario aumentar los niveles de verde urbano. Los techos verdes son una solución efectiva basada en la naturaleza para los problemas ecoambientales que surgen del cambio climático y la rápida urbanización porque brindan múltiples servicios ecosistémicos y pueden tener un impacto positivo significativo en el bienestar humano (Liu et al., 2021).

Estos techos proporcionan un conjunto de funciones adicionales a las de un techo convencional y se diseñan y construyen con parámetros técnicos relativamente sencillos sin necesidad de utilizar tecnologías costosas o altamente especializadas (Andres Ibañez, 2008). Además, son considerados, a largo plazo, más económicos que las cubiertas convencionales.

Figura 1

Cubiertas verdes sostenibles



Nota: tomado de (Mohsen , y otros, 2022)

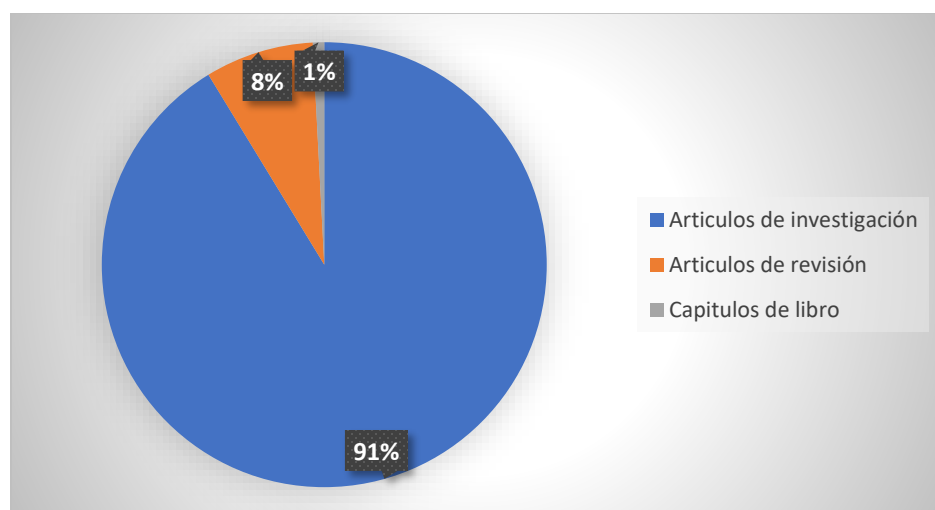
1.3 Análisis bibliométrico.

Para la recolección de la información y correcta realización de este proyecto se hizo uso de Scopus y WoS, resultando un total de 5628 estudios realizados en este campo.

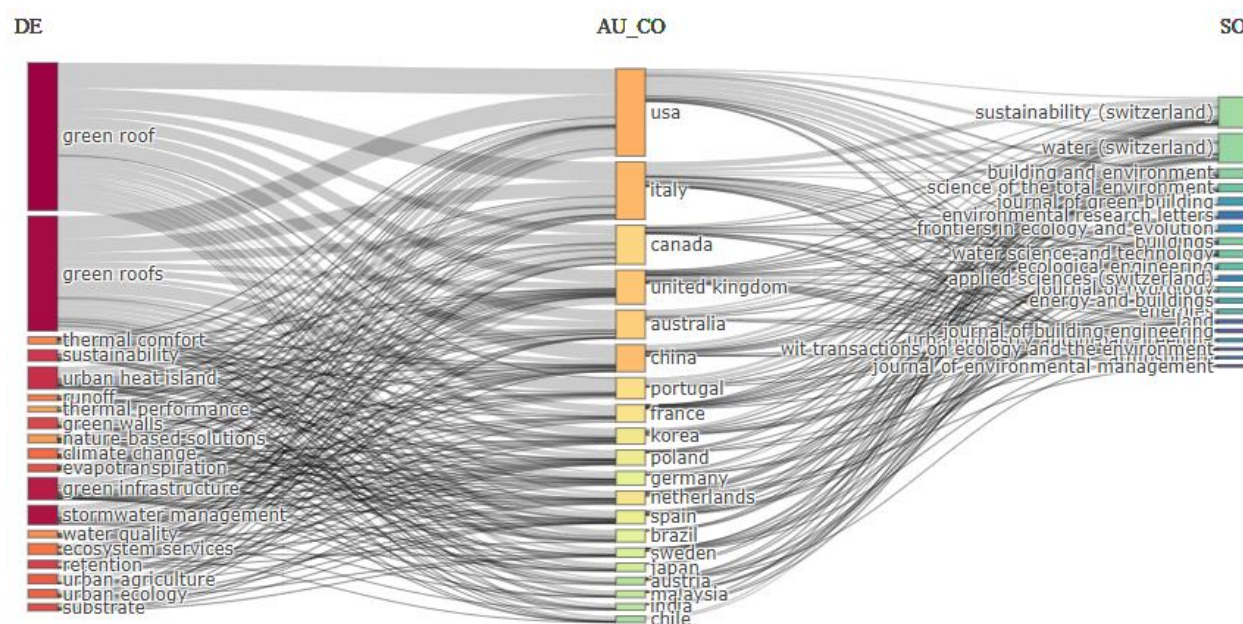
Con el fin de reducir la cantidad de información, se aplicó un filtro teniendo en cuenta el tipo de artículo (artículos de revisión, artículos de investigación y capítulos de libros), que estos hayan sido publicados durante los últimos 5 años y además que dicha información estuviera basada en áreas temáticas como la ingeniería y ciencia medio ambiental obteniendo como resultado 608 artículos de los cuales se escogieron los más relevantes con el fin de brindar una mejor visión del problema y las diversas alternativas de solución que se pueden implementar.

Figura 2

Tipos de documentos científicos

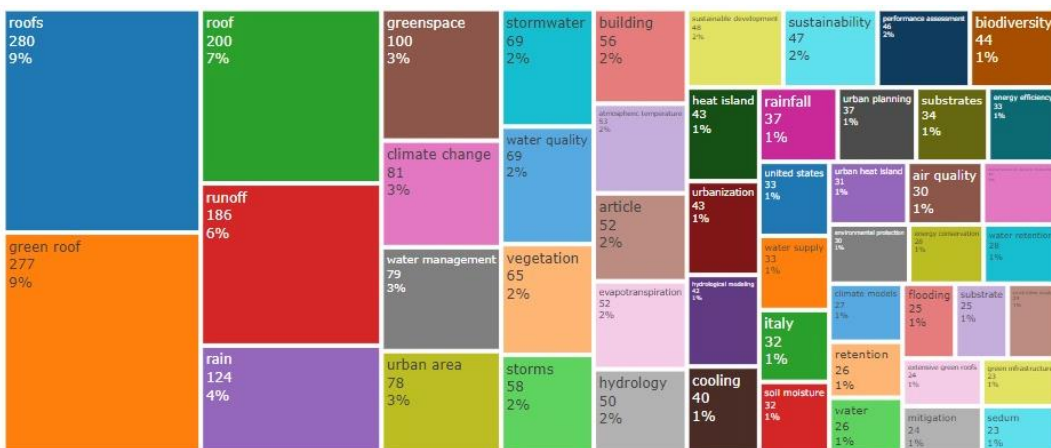


Nota. (Autores, 2024)

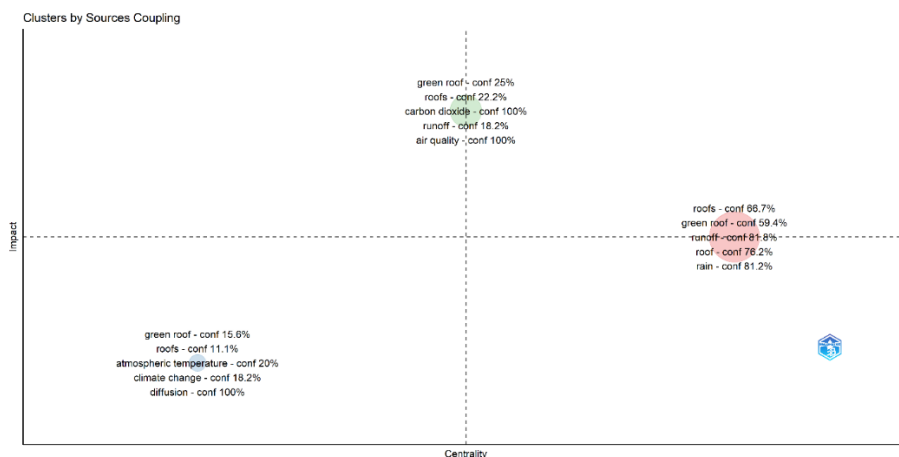
Figura 5*Tres campos**Nota.* (Autores, 2024)

La figura 6, es la representación porcentual que tienen estas palabras en la literatura científica, donde se puede apreciar que palabras como roofs y green roofs son las que encabezan la lista con un 9%, seguido de otras como roof, RunOff y rain, con un 7%, 6% y 4% respectivamente.

Esto nos muestra la estrecha relación que comparten estos términos dentro de la literatura científica, palabras que son utilizadas con frecuencia en las diferentes investigaciones que se realizan, lo cual nos incita a ver la importancia que tienen los techos verdes a la hora de estudiar las alternativas sustentables y su relación con las aguas pluviales.

Figura 6*Frecuencia de las palabras claves**Nota. (Autores, 2024)*

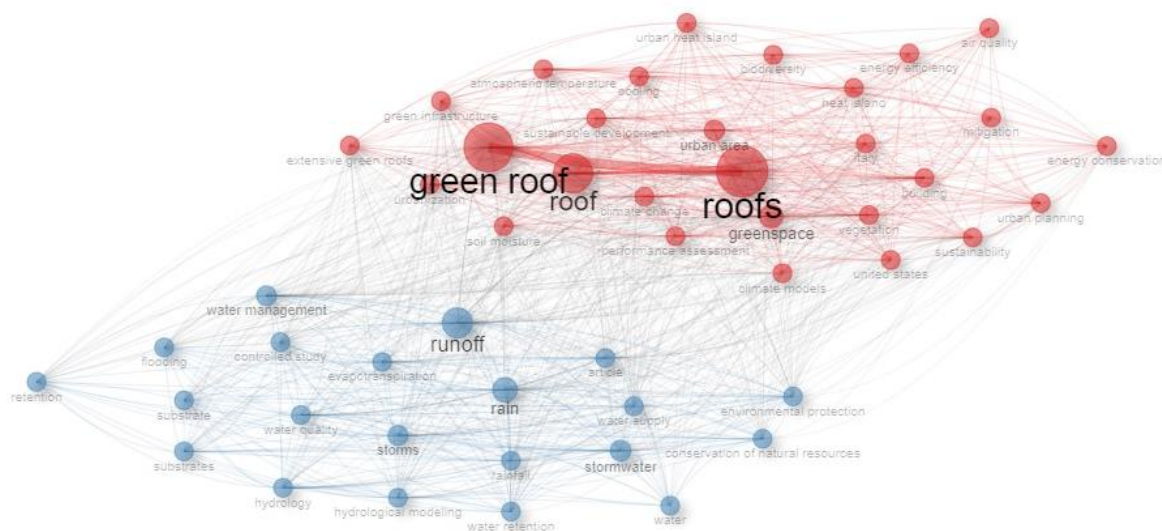
Organizando la información, como se muestra en la figura 7, es importante recalcar que a la hora de realizar estas investigaciones basta con utilizar términos sencillos, como lo pueden ser Green roofs, RunOff, los cuales en la comunidad científica se relacionan entre sí, lo que nos da la oportunidad de abarcar gran información respecto a estos temas, ya que frecuentemente su aparición en los textos es bastante alta.

Figura 7*Palabras claves por importancia**Nota. (Autores, 2024)*

La figura 8 es la representación de la iteración entre las palabras claves, donde el tamaño del círculo nos muestra la relación que poseen entre los estudios realizados, claramente se puede observar que la palabra green roofs está directamente relacionada con roofs, y que aparece frecuentemente en los estudios que se realizan sobre los RunOff y rain.

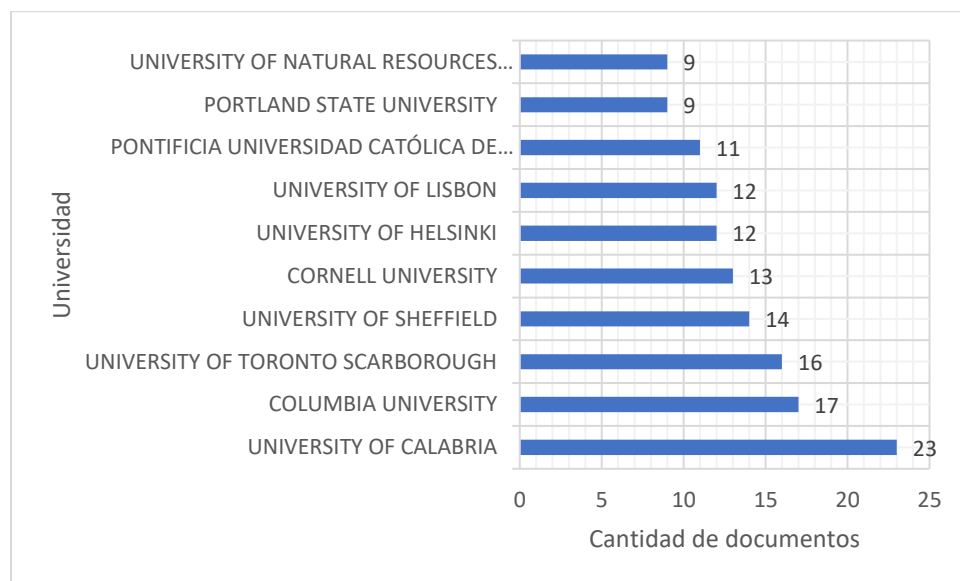
Figura 8

Iteración entre palabras claves

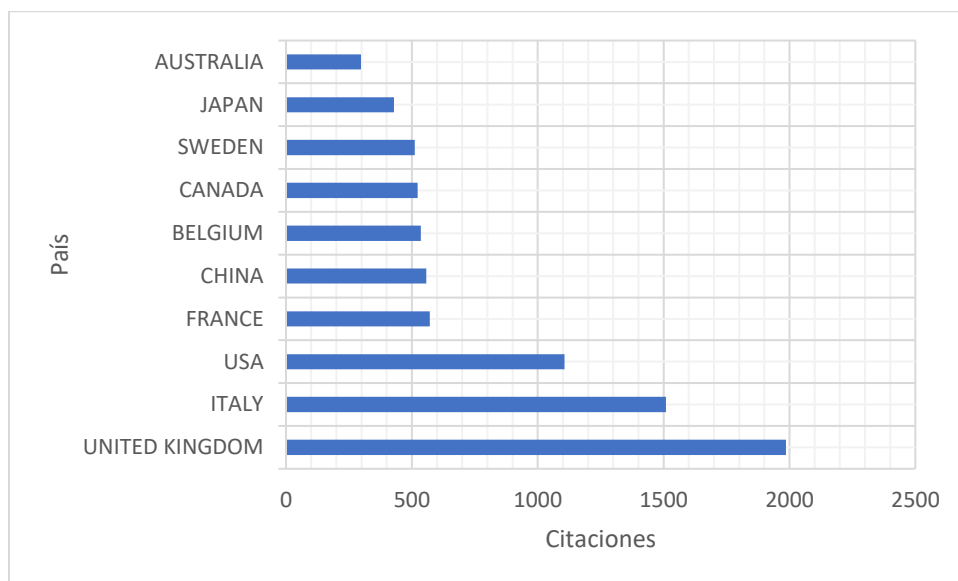


Nota. (Autores, 2024).

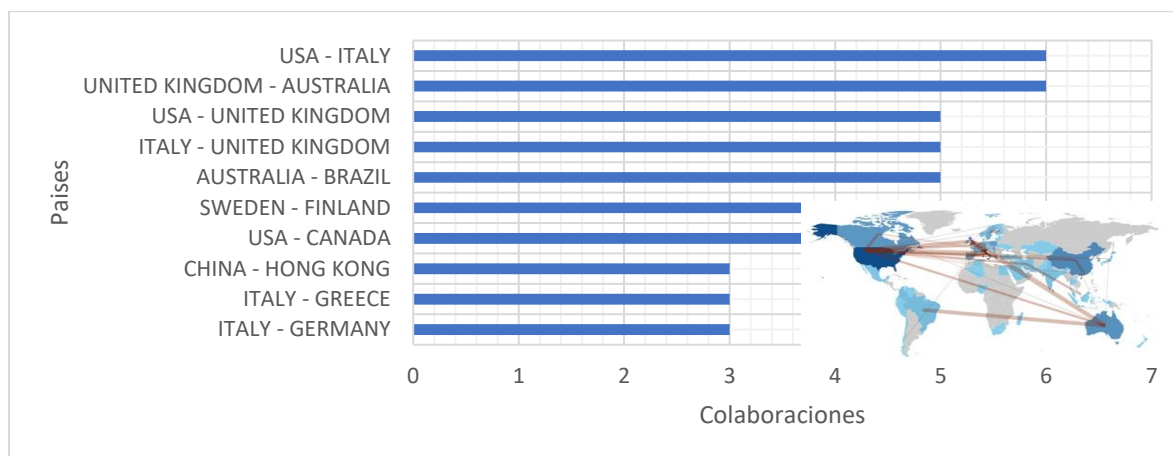
La siguiente gráfica representa las 10 universidades que más publicaciones han realizado respecto al tema de los techos verdes desde el año 2004, en donde claramente destaca la universidad de Calabria la cual ha realizado 23 estudios lo que representa el 18,54% del total. Le siguen la universidad de Columbia y la de Toronto con 17 y 16 estudios respectivamente, principalmente se destacan universidades de Estados Unidos y Europa, pero cabe destacar a la Universidad Católica de Chile, la cual ha publicado 11 artículos representando así un 8,87% del total de estudios, ubicándose como la octava Universidad que más investigaciones ha hecho a nivel global.

Figura 9*Instrucciones más relevantes**Nota. (Autores, 2024)*

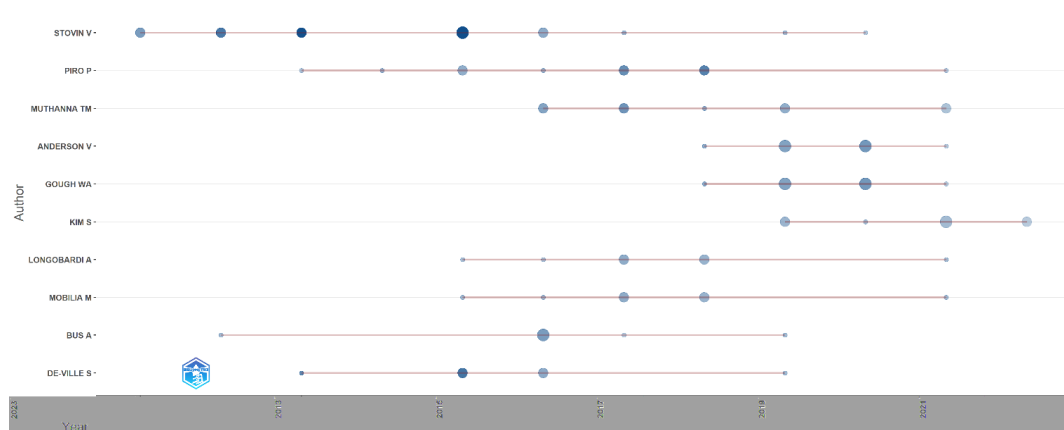
G&ut zt gi o t &k&hykx gt &uy&g yky&to kr& t jgr&w k& y&ki kt zgt &kz&ov&f k&
 α ky&ngi out ky&kt &ut j&k&ky&gi g&kt u& t oj&uy&hx&uy&f ks y&ut &? &ngi out ky&=& y&
 w k&og&w k&uy&om k&kt &km t ju& nxy&ut &t &uz&g&k&? 6? &kyw y&uj ks uy&kt i ut z&gx&
 Ky&gj uy& t oj uy&ut &76 && i nu& y&zx y&kt i ut z&gs uy&g&xt i og&& nd g&ut &=7&&; =&
 xky&ki zo gs kt zk& gxi gt ju&t g&ng&t &d k&kt i og&ky&ki zu&g&uy&xs kxuy&g yky&f u&hykx gs uy&g&
 t α m t &g y& jgs k&xi gt u&f kt zu&f k&ky&kt qd m&&xt i og&is kt zk&f&kh&g&w k&us uy&goy&ky&
 kt & g&f&f&ky&g&urru&ut j&k&g&g&zk&t go gy&f y&kt z&hr&ky&u&ut & &zro gj gy&f&ki kt zk& kt zk4

Figura 10*Citaciones por país**Nota. (Autores, 2024)*

Rgdom xg72kyg&kvxykt zgi o t & k&g&urghuxgi o t &kt z&k&uy&goyky&ut j k& yg&Ogrog&&
 Xkt u& t oj u&G yzgro&ut &uy&goyky&w k& y&urghuxgt &kt z&k& &ut &t &uzgr&j&&
 i urghuxgi aut ky&kt z&k&gj g&t u&ux&u&kt k&gr&kygy&urghuxgi aut ky&ky&xykt zgt &kt z&k&goyky&w k&
 vxkykt zgt &gy& oys gy&xuhrks gzi gy&g&ki kyoj gj &k&g&ur i aut ky&ky&zy&xuhrks gy&kt k&g&u&
 & z&xi gs hou& z u&ky&ut ui & kt zuy&u& gr&gx&g&us t oj gj &kt z&i g&ky&k&ngt &
 & vuxzt i &g4

Figura 11*Colaboraciones entre países**Nota. (Autores, 2024)*

La figura 12, es la representación de los 10 autores más importantes en la comunidad científica respecto al estudio de los techos verdes, gracias a ellos la producción de investigaciones a nivel global ha crecido considerablemente desde el año 2013. Podemos observar que dentro de los más constantes se encuentra Stovin V, quién prácticamente lleva 9 años dedicados a la investigación sobre los techos verdes.

Figura 12*Evolución de los autores a lo largo de los años**Nota. (Autores, 2024)*

En la tabla 1 podemos observar los artículos más citados a la hora de hablar sobre los techos verdes, es destacable el trabajo del autor Nicholas S.G. Williams quién cuenta con 2 de los 10 estudios más referenciados, siendo el *Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes* el más referenciado, con un total de 672 citas.

Es evidente la preocupación de los autores a la hora de estudiar este tipo de alternativas como lo son los techos verdes, ya que a medida que pasa el tiempo problemáticas como la ola de calor, inundaciones, confort térmico, son más evidentes en la sociedad, y gracias a este tipo de investigaciones se puede dar solución o por lo menos tratar de mejorar la calidad de vida de las personas.

Tabla 1

Artículos más citados sobre techos verdes

AUTOR	AÑO	TÍTULO DE LA PUBLICACIÓN	REVISTA	DOI	CITAS
NICHOLAS S.G. WILLIAMS	2015	Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes	Landscape and Urban Planning	10.1016/j.landurbplan.2014.10.018	672
PRASHANT KUMAR	2017	Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review	Atmospheric Environment	10.1016/j.atmosenv.2017.05.014	574
HIDEKI TAKEBAYASHI	2007	Surface heat budget on green roof and high reflection roof for	Building and Environment	10.1016/j.buildenv.2006.06.017	421

AUTOR	AÑO	TÍTULO DE LA PUBLICACIÓN	REVISTA	DOI	CITAS
		mitigation of urban heat island			
DAN LI	2014	The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies	IOPSCIENCE	10.1088/1748-9326/9/5/055002	316
ANNA PALLA	2015	Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale	Journal of Hydrology	10.1016/j.jhydrol.2015.06.050	281
NICHOLAS S. G. WILLIAMS	2014	Do green roofs help urban biodiversity conservation?	British Ecological Society	10.1111/1365-2664.12333	173
LILLIANA LH PENGY	2013	Effects of green roof on neighborhood microclimate and human thermal sensation	MDPI	10.3390/en6020598	164
SARA SIMONA CIPOLLA	2016	A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM	Ecological Engineering	10.1016/j.ecoleng.2016.07.009	162
TIMOTHY VAN RENTERGHEM	2009	Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs	Building and Environment	10.1016/j.buildenv.2008.07.013	161

1.4 Análisis crítico

Una retrospectiva contextual de este saber nos permite dar un poco de mediana luz al más desprevenido lector lo que facilita imaginar de que se trata. Los conceptos tratados son básicos para entender la dinámica de esta fabulosa propuesta respaldada desde la antigüedad y sustentada por no menos de 5.500 estudios. La vanguardia es internacional y en nuestras zonas

suramericana Brasil y Colombia figuran con la intención y puesta en marcha de tan positivo proyecto.

En nuestras regiones suramericana, aun no pareciera prosperar este concepto y se le puede tomar como un aspecto más decorativo, innovador y estético, sin embargo las bondades de techos verdes van mucho más allá y están relacionadas con una solución al flujo pluviométrico, la esorrentía, el mejoramiento de la temperatura al interior de edificaciones, el aprovechamiento de espacios citadinos para el cultivo de especies menores de consumo como la horticultura y las especies aromáticas, todo de la mano con la sostenibilidad ambiental y las practicas ambientalistas positivas. Romper el paradigma de integrar en la construcción un techo que favorezca estas bondades no es un asunto que se dé inmediatamente, pero desarrollar iniciativas particulares facilitara que muchos puedan imitar la propuesta y descubrir otras dimensiones que incluso generen otras ofertas en el campo turístico, productivo y cultural.

Capítulo 2. Estudios sostenibles a nivel internacional que emplearon techos verdes.

En este capítulo se da una introducción a los techos verdes y se aborda analíticamente los estudios realizados a nivel internacional para la implementación de techos verdes como alternativa constructiva sostenible.

2.1 Casos de estudio.

2.1.1 América del Norte

2.1.1.1 Caso de Canadá. Debido a que en los últimos años la urbanización ha provocado inundaciones más frecuentes en las zonas urbanas, y que algunos estudios han demostrado que la tecnología de techos verdes puede reducir las aguas pluviales solo en un pequeño rango de climas, se realizó un estudio para investigar el rendimiento de retención de un techo verde en varios climas de Canadá. Se seleccionaron seis ciudades canadienses: Vancouver, Calgary, Regina, Toronto, Londres y Halifax. Se utilizó la ecuación del balance de agua junto a los modelos de evapotranspiración para simular la escorrentía producida por los techos verdes con dos tipos de vegetación diferente. El periodo de simulación seleccionado fue de siete años que va desde 2000 - 2006, con el modelado realizado durante ocho meses del año utilizando pasos de tiempo por hora. Los resultados mostraron que el desempeño de un techo verde en la reducción de la escorrentía depende de la ubicación, variando del 17% - 50% para plantas de bajo consumo de agua. El peor desempeño en la reducción de aguas pluviales ocurrió en Halifax y Vancouver, mientras que el mejor desempeño se obtuvo en las ciudades de Regina y Calgary. Además, el impacto de los tipos de vegetación (diferentes tasas de evapotranspiración) tuvo una mayor influencia en la reducción de aguas pluviales en todos los lugares que el impacto de los aumentos

en la capacidad de almacenamiento del sustrato, debido a cambios en la porosidad o espesor del sustrato. Por último, cabe mencionar que la aplicación de plantas que consumen mucha agua puede no ser una opción en climas secos, ya que las plantas pueden no ser resistentes a la sequía a menos que se considere un sistema de riego (Talebi, Bagg, Sleep, & O'Carroll, 2019).

2.1.1.2 Caso de Estados Unidos. El aire de la ciudad a menudo contiene altos niveles de contaminantes que son dañinos para la salud humana. Es por esto que se llevó a cabo un estudio en Chicago, Illinois, la cual ocupa el puesto número uno en términos de área total de techos verdes instalados entre las ciudades de América del Norte. Este estudio consistió en hallar el nivel de eliminación de la contaminación del aire por parte de los techos verdes en Chicago, el cual se cuantificó utilizando un modelo de deposición seca. Los resultados mostraron que un total de 1675 kg de contaminantes del aire fueron eliminados por 19,8 hectáreas de techos verdes en un año con O₃ representando el 52% del total, NO₂ (27%), PM₁₀ (14%) y SO₂ (7%). En mayo se obtuvo el mayor nivel de remoción de contaminación del aire y en febrero se obtuvo el más bajo. La remoción anual por hectárea de techo verde fue de 85 kg/ ha* año. La cantidad de contaminantes removidos aumentaría a 2046,89 Ton métricas si todos los techos de Chicago estuvieran cubiertos con techos verdes intensivos. Por último, se concluye que los techos verdes se pueden utilizar para complementar el uso de árboles urbanos en el control de la contaminación del aire, especialmente en situaciones donde la tierra y los fondos públicos no son tan accesibles (Yang, Yu, & Gong, 2008).

2.1.2 Latinoamérica.

2.1.2.1 Caso de Brasil. Si bien se han realizado investigaciones sobre los techos verdes y su implementación como estrategia bioclimática para mejorar la eficiencia energética de los edificios, aún se requieren datos cuantitativos sobre este tema para condiciones climáticas más específicas. Es por esto que se realizó un estudio sobre el desempeño térmico de un techo verde de una residencia unifamiliar experimental en la ciudad de Florianópolis, Brasil, la cual tiene clima templado (Parizotto & Lamberts, 2011). Las mediciones de campo se realizaron en un período cálido (01/03/2008 - 07/03/2008) y durante un período frío (25/05/2008 - 31/05/2008) incluyeron la temperatura del aire interno de las habitaciones, la temperatura de la superficie interna y externa de tres tipos de techos (verdes, cerámicos y metálicos), flujos de calor a través de estos techos, perfil de temperatura del techo verde, contenido volumétrico de agua en la capa de sustrato y datos meteorológicos. Los resultados mostraron que, durante el período cálido, el techo verde redujo la ganancia de calor en un rango de 92% - 97% en comparación con los techos cerámicos y metálicos, respectivamente, y mejoró la pérdida de calor entre un 20% - 49%. Mientras que, durante el período frío, el techo verde redujo la ganancia de calor en un 70% - 84%, y redujo la pérdida de calor en un 44% - 52% en comparación con los techos cerámicos y metálicos, respectivamente. Por último, se concluye que el techo verde contribuye a los beneficios térmicos y a la eficiencia energética de un edificio en condiciones de clima templado. No obstante, los parámetros de diseño deben ser cuidadosamente considerados para evitar un mal desempeño de los techos verdes en períodos fríos (Parizotto & Lamberts, 2011).

2.1.3 Europa.

2.1.3.1 Caso de Reino Unido. Se realizó una investigación en la que se obtuvieron datos de lluvia y escorrentía de un banco de pruebas de techos verdes en el Reino Unido, los cuales se han recopilado continuamente durante un período de 29 meses desde 01/01/2007 hasta 31/05/2009. El período de monitoreo fue bastante típico de los promedios climáticos a largo plazo de la ubicación, aunque el conjunto de datos incluye algunos eventos extremos en junio de 2007, los cuales están asociados a graves inundaciones. Las precipitaciones se monitorearon utilizando un pluviómetro de cubeta basculante ARG-100 de Enviromental Measures con resolución de 0,2 mm ubicado junto al banco de pruebas. Con el objetivo de enfocarse en el desempeño del sistema bajo eventos de lluvia que probablemente sean de interés desde la perspectiva de la gestión de aguas pluviales/drenaje urbano, se aplicó un análisis del período de retorno para identificar aquellos eventos de tormenta con una profundidad de lluvia superior a 5 mm y un período de retorno mayor a un año. Teniendo en cuenta este criterio, se identificaron 22 eventos significativos, de los cuales 21 tienen registros confiables de escorrentía. El techo verde proporcionó 50,2% de retención de lluvia anual acumulada, con una retención volumétrica total equivalente al 30% durante los eventos significativos. Las cifras de rendimiento anual son inferiores si se les compara con un rango de datos internacional, lo que refleja el hecho de que la profundidad de las lluvias puede ser mayor y las tasas de evapotranspiración menores que en algunos entornos climáticos más continentales. El desempeño de la retención fue mayor cuando se consideraron todos los eventos de tormenta, con una retención media y mediana de 70% y 91% para todas las tormentas, y 61% y 62% para las tormentas con lluvia > 2 mm. Esto quiere decir que los techos verdes pueden hacer una contribución significativa a la mitigación de la escorrentía de tormentas asociada con eventos de lluvia de alta frecuencia. La retención reducida

al 43% y 30,2% para tormentas con período de retorno mayor a un año con atenuación máxima media del 60% para estas importantes tormentas. Estas cifras brindan una indicación clara de que los techos verdes podrían desempeñar un papel importante en el suministro de controles de fuente como parte de los trenes de tratamiento de SUDS (Stovin, Vesuviano, & Kasmin, 2011).

2.1.3.2 Caso de Países Bajos (Ámsterdam). Debido a la falta de investigación sobre el efecto térmico de los techos azul-verde, se realizó una investigación en la ciudad de Ámsterdam, mediante la cual se estudió el efecto térmico de los techos azul-verde con el objetivo de evaluar su potencial para proteger el ambiente interior de las temperaturas exteriores extremas (olas de frío y calor). Se examinaron las diferencias entre los techos de color verde azulado y los techos de grava convencionales desde la perspectiva de las temperaturas de la superficie del techo y las temperaturas interiores en edificios de la ciudad de Ámsterdam a finales de 2020. Según los valores tomados por el sensor de temperatura, se indica que las temperaturas de la superficie exterior para los techos azul-verde son más bajas en verano y hay menos fluctuaciones durante todo el año que las temperaturas de los techos convencionales. Los resultados muestran que, durante tres períodos cálidos durante el verano de 2021, las temperaturas del sustrato superficial alcanzaron su punto máximo en promedio 5°C más para techos de grava que para techos azul-verde. Por otro lado, durante los períodos cálido-frío, la temperatura dentro de la capa de la caja de agua fue más estable que las temperaturas de la superficie del techo. Mientras que durante un período frío en invierno las temperaturas mínimas de la capa de la caja de agua se mantuvieron en 3°C más alto que otras temperaturas de la superficie exterior. Las mediciones muestran un efecto sistemático positivo en el ambiente interior bajo un techo verde-azul en comparación con el tipo de techo de grava tradicional. La variación de temperatura es menor debajo de los techos

azul-verde en comparación con los techos de referencia durante los períodos cálido y frío. Esto sugiere que las habitaciones ubicadas bajo un techo verde-azul son menos sensibles a la temperatura del aire exterior y su variación diurna natural. Sin embargo, estos efectos se espera que sean pequeños (Follmi, Corpel, Solcerova, & Kluck, 2023).

2.1.3.3 Caso de Finlandia. En Helsinki, la ciudad más poblada de Finlandia, se realizó una investigación con el fin de investigar el efecto de la implementación de techos verdes en la esorrentía de aguas pluviales en distritos urbanos vulnerables. Por lo tanto, esta investigación, en primer lugar, identifica los distritos vulnerables a las inundaciones por aguas pluviales; segundo, mide el impacto de las implementaciones de techos verdes bajo diferentes eventos de precipitación; y, en tercer lugar, evalúa los impactos de diferentes niveles de implementaciones de techos verdes con diferentes tasas de retención en función de los escenarios espacialmente explícitos propuestos (Twohig et al., 2022c).

En este estudio se analizaron tres clases de escenarios para evaluar el impacto de las inundaciones por esorrentía en Helsinki; la línea de base, la infiltración de la cubierta terrestre y los escenarios de techo verde. Estos escenarios se construyen considerando eventos de precipitación de 40, 60, 80 y 100mm. Además, para comparar los niveles de eficiencia de los techos verdes, se crearon dos escenarios: uno con tasa de retención del techo verde del 25% y otro con retención del 60%. Adicionalmente, se compararon diferentes niveles de implementación de techos verdes. Considerando los techos disponibles, se asumió que los techos verdes se pueden implementar en el 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de las superficies del techo. En la siguiente tabla se observa detalladamente dicha información.

Tabla 2

Descripción general de los escenarios que se consideran

Guion	Nombre	Implementación de techos verdes
Base	Base	No se implementó un techo verde
Cobertura terrestre	Cobertura terrestre	No se implementó un techo verde; las tasas de infiltración se consideran con respecto a la clasificación de la cobertura terrestre
Tasa de retención del techo verde del 25%	Escenario 1	Implementando en el 25% de los techos+infiltración de cobertura terrestre considerado
	Escenario 2	Implementando en el 50% de los techos+infiltración de cobertura terrestre considerado
	Escenario 3	Implementando en el 75% de los techos+infiltración de cobertura terrestre considerado
	Escenario 4	Implementando en el 100% de los techos+infiltración de cobertura terrestre considerado
Tasa de retención del techo verde del 60%	Escenario 5	Implementando en el 25% de los techos+infiltración de cobertura terrestre considerado
	Escenario 6	Implementando en el 50% de los techos+infiltración de cobertura terrestre considerado
	Escenario 7	Implementando en el 75% de los techos+infiltración de cobertura terrestre considerado
	Escenario 8	Implementando en el 100% de los techos+infiltración de cobertura terrestre considerado

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

En la tabla 2 se puede observar la descripción general de los escenarios que se consideran. Estos escenarios se aplican a eventos de precipitación de 40, 60, 80 y 100 mm.

Luego se calcularon las profundidades promedio de inundación para identificar los beneficios de implementar el techo verde bajo dichos escenarios.

Tabla 3*Cambios porcentuales en la profundidad promedio de inundación (AFD)*

Guion	Resultados para 40 mm		Resultados para 60 mm		Resultados para 80 mm		Resultados para 100 mm	
	AFD	% cambiar	AFD	% cambiar	AFD	% cambiar	AFD	% cambiar
Base	26	N/A	37. 2	N/A	46. 3	N/A	53. 8	N/A
Cobertura terrestre	18	-31%	29. 2	-21%	38. 3	-17%	45. 8	-15%
Escenario 1	17. 7	-1%	28. 9	-1%	37. 8	-1%	45. 2	-1%
Escenario 2	17. 5	-3%	28. 5	-3%	37. 4	-3%	44. 6	-3%
Escenario 3	17. 2	-4%	28. 1	-4%	36. 9	-4%	43. 9	-4%
Escenario 4	17	-6%	27. 7	-5%	36. 4	-5%	43. 3	-5%
Escenario 5	17. 4	-3%	28. 3	-3%	37. 2	-3%	44. 3	-3%
Escenario 6	16. 8	-7%	27. 4	-6%	36	-6%	42. 8	-6%
Escenario 7	16. 2	-10%	26. 6	-9%	34. 8	-9%	41. 4	-10%
Escenario 8	15. 6	-13%	25. 7	-12%	33. 6	-12%	39. 9	-13%

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

En la tabla 3 se puede observar los cambios porcentuales en la profundidad promedio de inundación (AFD). El escenario de cobertura terrestre se compara con la línea de base, mientras que los escenarios 1 a 8 se comparan con el escenario de cobertura terrestre.

Los resultados mostraron que la implementación de techos verdes de bajo nivel con bajas tasas de retención reduce la profundidad de inundación promedio en solo un 1 %. Por el contrario, el escenario máximo de techo verde disminuyó la mayor parte de la profundidad de inundación promedio (13 %) y redujo la cantidad de sitios vulnerables (Twohig et al., 2022c).

2.1.3.4 Caso de Suecia. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) predijo un aumento en los patrones de precipitación en el norte y el oeste de Europa (hasta un 15-30 %) (IPCC, 2007) y un 40 % en Suecia para 2100 (Sjökvist et al., 2015). Provocando esto preocupación sobre los sistemas de drenaje que existen en el país, debido a que el número de inundaciones es cada vez mayor, afectando principalmente a los sistemas de carreteras, que se habían diseñado utilizando valores de precipitación antiguos. Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio fue evaluar los eventos de inundaciones y las posibles medidas de reducción de riesgos (adaptación) utilizando medidas de inundaciones reales.(Mourad et al., 2022).

Se plantearon 4 posibles soluciones dentro de ellas: La forestación, techos verdes, instalación de alcantarillas y estanques de detención de usos múltiple. Para evaluar la eficacia de estas cuatro posibles soluciones, se utilizaron hidrogramas que se generaron a partir del método NRCS y el modelo HEC-HMS.

Dando como resultado que los techos verdes son la solución más efectiva para reducir las inundaciones debido a lluvias moderadas, además de mejorar la calidad del aire debido a su vegetación, Además, los techos verdes se han denominado techos de biodiversidad (Dunnett, 2006), por lo tanto, mejoran el confort climático, contribuyendo así a la felicidad y la salud, también pueden usarse para cultivar vegetales en los techos o mejorar la capacidad de plantar árboles u otra vegetación cerca de las calles. (Mourad et al., 2022).

2.1.3.5 Caso de Italia. En las últimas décadas, los techos verdes se han propuesto entre varias soluciones basadas en la naturaleza, como herramientas prometedoras y sostenibles para

mitigar el riesgo de inundaciones urbanas y adaptarse a los cambios climáticos. Se han sugerido varios tipos de vegetación como capas superiores de techos verdes, según la región y el propósito del techo (Cristiano et al., 2020).

En este estudio realizado en Cagliari (Italia), se compara la capacidad de mitigación de inundaciones de los techos verdes con vegetación CAM y vegetación C3, por medio del modelo ecohidrológico de caudal (EHSM) conceptual concentrado, utilizando una serie temporal de 51 años de lluvia.

Dando como resultado que la Vegetación C3 garantiza un mejor desempeño en la mitigación de eventos de lluvia a comparación con la vegetación CAM, ya que presentan una mayor tasa de evapotranspiración.

Por otra parte, la vegetación CAM presenta múltiples beneficios, como bajos costes de instalación y mantenimiento, especialmente en zonas mediterráneas, donde las plantas CAM forman parte de la vegetación autóctona y no necesitan riego artificial (Cristiano et al., 2020).

2.1.3.6 Caso de España. En Barcelona, España. Una de las ciudades más compactas y densas de Europa, mediante el desarrollo de una herramienta de detección espacial multicriterio se buscó determinar:

1) dónde se deben priorizar los techos verdes en Barcelona en función de la demanda obtenida por expertos para una amplia gama de servicios ecosistémicos.

2) qué tipo de diseño de techos verdes potenciales optimizaría la provisión de servicios ecosistémicos.

Como entradas al modelo, se seleccionaron quince indicadores espaciales como sustitutos de los déficits y demandas de servicios ecosistémicos (regulación térmica, control de escorrentía, hábitat y polinización, producción de alimentos, recreación y cohesión social) junto con cinco alternativas de decisión para el diseño de techos verdes (extensivo, semi-intensivo, intensivo, naturalizado y adjudicado). Estos indicadores y alternativas se analizaron de forma probabilística y espacial, y luego se ponderaron de acuerdo con los comentarios de los expertos locales.

Los resultados del modelo de oferta indican claramente la primacía de las cubiertas naturalizadas sobre otras alternativas de diseño en Barcelona. Una posible explicación es que la alta importancia otorgada al hábitat y la polinización por el modelo de demanda se tradujo en que la alternativa de techo naturalizado dominaba su competencia en el modelo de oferta (Langemeyer et al., 2020).

2.1.4 Asia

2.1.4.1 Caso de India. En tres ciudades de Irán con diferentes condiciones climáticas (Tabriz: frío y seco; Teherán: templado y seco; y Bandar Abbas: tropical y seco) se realizó la simulación y el modelado del uso de energía para un edificio teórico de dos pisos que está equipado con un techo verde, con el propósito de mostrar los impactos del techo verde en la reducción de las cargas térmicas de un edificio y también su papel en la reducción del flujo de calor que atraviesa el techo del edificio (Zahedi et al., 2023), Para cada ciudad primero se

modela en 3D en un software un edificio normal con techo de asfalto junto con un edificio completamente similar que tiene cubierta vegetal en lugar de asfalto y luego con esta información se realiza una simulación en diferentes periodos de tiempo en Energy Plus.

Los resultados del modelado y las simulaciones muestran que, al aplicar el techo verde, el modo básico de consumo de energía en las ciudades de Tabriz, Teherán y Bandar Abbas disminuyó un 23 %, 12,5 % y 16,3 % respectivamente y que el consumo de energía del edificio depende en gran medida de los parámetros del techo verde (el espesor del suelo y la densidad de plantas).

En Mashhad, la segunda ciudad más poblada de Irán, situada en un clima cálido y seco, el cambio climático ha provocado que la temperatura suba en los últimos años. Se realizó un estudio que explora el confort térmico y que tiene como objetivo demostrar la importancia de los techos verdes mediante el diseño de un techo verde para el clima cálido y árido de la región(citar).

Se realizó una muestra aleatoria a 406 residentes de trece barrios distintos de Mashhad buscando conocer su punto de vista sobre la creación y desarrollo de techos verdes, en el que se preguntó a los residentes sobre su familiaridad con los techos verdes y la cantidad de espacio de techo verde en sus hogares.

Las conclusiones de este estudio indican que los efectos positivos de los techos verdes priman por encima de los efectos negativos y se extienden más allá de la ciudad de Mashhad

ocasionando un impacto global. Cuando el desarrollo de techos verdes se realiza a gran escala en una ciudad o región, se compensan muchas de las consecuencias negativas del cambio medioambiental de las últimas décadas (Rahimi et al., 2022).

2.1.4.2 Caso de China. Debido a que pocos estudios empíricos se han centrado en el efecto refrescante de los proyectos de techos verdes a escala urbana, se realizó un estudio en la isla de Xiamen, China, donde 540.000 metros cuadrados de techos verdes se implementaron entre 2015 y 2017, con el objetivo de abordar dos preguntas de investigación: (1) ¿Los techos verdes en áreas urbanas de alta densidad tienen un efecto de enfriamiento significativo a escala en la ciudad?, y (2) ¿Cuál es el alcance del enfriamiento? (Dong, y otros, 2020). La diferencia relativa entre la temperatura de promedio de la superficie terrestre de la isla de Xiamen y los techos verdes derivados de la imagen de teledetección del satélite Landsat 8 en los veranos de 2014 y 2017, se calculó en los sistemas de información geográfica (SIG) para representar el efecto de enfriamiento del proyecto de techo verde. Los resultados de esta investigación mostraron que: (1) la diferencia promedio de LST (Land surface temperature) entre los techos verdes y la isla de Xiamen disminuyó en 0,91 °C, indicando que los techos verdes podrían aliviar efectivamente los efectos de isla de calor urbano en áreas de alta densidad; (2) El efecto de enfriamiento fue significativo hasta 100 metros desde la instalación del techo verde en la isla de Xiamen, lo cual se conoce como zona de amortiguadora de enfriamiento característica; (3) El análisis de regresión reveló que por cada aumento de 1000 metros cuadrados en el área del techo verde, la LST promedio del techo y su zona amortiguadora de enfriamiento característica disminuyó en 0,4°C. Estos hallazgos proporcionan la prueba empírica del efecto de enfriamiento de los techos verdes en el entorno circundante en áreas urbanas de alta densidad y conocimientos

importantes sobre la mitigación efectiva de los impactos de la isla de calor urbano (Dong, y otros, 2020).

2.1.4.3 Caso de Corea del Sur. El techo azul-verde es una combinación de dos palabras, donde verde significa que el techo tiene vegetación/plantas y azul significa que el techo tiene una capa de almacenamiento igual que el techo azul. Este nuevo concepto modificado de techos verdes es desarrollado por investigadores del Instituto Coreano de Ingeniería Civil y Tecnología de la Construcción para lograr múltiples beneficios (Shafique & Kim, 2017). El techo azul-verde tiene el potencial de reducir la temperatura de la superficie de un edificio en las áreas urbanas y es una práctica innovadora de desarrollo de bajo impacto que ha demostrado ser una opción para mitigar el fenómeno de la isla de calor en el área urbana, pues tiene la capacidad de almacenar agua de lluvia en la vegetación, la capa del suelo y aumenta la tasa de evapotranspiración que disminuye la temperatura de un área. Teniendo en cuenta esto, se instaló un techo azul-verde en el techo del edificio de la escuela secundaria Cheong-un en Seúl, Corea del Sur. Durante los diferentes escenarios de tiempo se analizó la temperatura de la superficie del techo azul-verde y el techo de control y se compraron sus resultados entre sí. Los resultados revelaron que la temperatura de la superficie del techo azul-verde fue mucho menor en comparación con el techo de control en las mismas condiciones climáticas. De los resultados también se concluye que el valor de la temperatura de la superficie del techo azul-verde fue inferior de 5°C a 9°C en comparación con el techo de control (Shafique & Kim, 2017).

2.1.4.4 Caso de Singapur. Con el objetivo de promover los techos verdes en Singapur, la Junta de Parques Nacionales y la Junta de Desarrollo de la Vivienda de Singapur se embarcaron

conjuntamente en un proyecto piloto para instalar un techo verde en el techo existente de un estacionamiento de varios pisos en una urbanización pública. Sirviendo como sitio de demostración e investigación, esta es también la primera instalación importante de techo verde en Singapur. A partir de este proyecto se describieron cuatro sistemas distintos de techos verdes utilizados en la instalación y los resultados de varios estudios realizados en conjunto con el proyecto. Estos estudios se centraron en la evaluación de plantas adecuadas, los beneficios térmicos asociados y los cambios en la calidad del aire derivados de la instalación (Tan & Sia, 2005). Para el estudio de plantas adecuadas, el déficit de agua atmosférico diario estimado mostró que las plantas experimentaron períodos irregulares de agotamiento de agua en la zona de la raíz, lo que indica una necesidad de usar plantas tolerantes a la sequía incluso en condiciones tropicales húmedas. La evaluación de los beneficios ambientales comparó las condiciones en el techo antes y después de la instalación visible registrada en las fachadas de los bloques de apartamentos residenciales que dan directamente al aparcamiento de varios pisos, reduciendo así el deslumbramiento y mejorando el confort visual de los ocupantes. El uso de imágenes térmicas infrarrojas y sensores de temperatura de termopar mostró diferencias significativas en las temperaturas superficiales entre superficies cubiertas de vegetación o expuestas. Se registraron diferencias marginales en la temperatura del aire ambiente. Por último, en cuanto a la evaluación de los cambios en la calidad del aire, se observaron las concentraciones de contaminantes gaseosos ácidos y partículas, lo que mostró resultados variables. Por un lado, los contaminantes gaseosos ácidos dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno mostraron una reducción marginal después de las instalaciones; y, por otro lado, la concentración de masa de partículas PM10 y PM2.5 aumentó de forma significativa después de la instalación, pero la concentración numérica disminuyó marginalmente (Tan & Sia, 2005).

2.1.5 Oceanía.

2.1.5.1 Caso de Australia. Partiendo de la evidencia existente de que los techos verdes ocasionalmente pueden actuar como una fuente más que un sumidero de contaminantes, se realizó una investigación en la que se estudió la calidad del agua de salida de los sistemas de techos verdes intensivos y extensivos durante nueve meses en la ciudad de Adelaide, Australia. El objetivo fue examinar los efectos de diferentes configuraciones de techos verdes en la calidad de las aguas pluviales y comparar esto con la esorrentía de los techos de aluminio y asfalto como superficies de control. Las concentraciones de contaminantes en la esorrentía de los techos verdes intensivos y extensivos generalmente disminuyeron durante el período de estudio y por medio de la comparación entre los dos tipos de techo verde se mostró que, a excepción de algunos eventos para EC, TDS y cloruro, los valores de los parámetros como el pH, la turbidez, el fosfato, el nitrato y el potasio en los efluentes de techos verdes intensivos fueron mayores que en los efluentes de los techos verdes extensivos. Estas concentraciones se compararon con las pautas de calidad del agua locales, estatales, nacionales e internacionales para investigar la posibilidad de que la esorrentía de salida de los techos verdes se reutilice para fines potables y no potables. El estudio concluye con que el diseño urbano sensible al agua (WSUD) es una estrategia importante para crear ciudades habitables en el futuro y la integración de esta estrategia con los sistemas de agua urbanos puede aliviar la presión sobre los recursos hídricos urbanos. Además, se halló que el desagüe de los techos verdes puede proporcionar una fuente de agua alternativa para fines no potables, como el riego de jardines urbanos y la descarga de inodoros (Razzaghmanesh, Beecham, & Kazemi, 2014).

2.1.6 Cuadro Resumen

Tabla 4

Cuadro resumen

UBICACIÓN		PROBLEMÁTICA	SOLUCIÓN	FUENTE
AMERICA DEL NORTE	CANADÁ	Inundaciones frecuentes en zonas urbanas.	se realizó un estudio para investigar el rendimiento de retención de un techo verde en varios climas de Canadá	(Talebi, Bagg, Sleep, & O'Carroll, 2019).
	ESTADOS UNIDOS	Altos niveles de contaminantes dañinos para la salud humana.	Se realizo un estudio donde se comprobo que si todos los techos verdes de Chicado fueran verdes, habria una remoción de contaminantes de 2046, 89 Ton metricas.	(Yang, Yu, & Gong, 2008).
LATINOAMERICA	BRASIL	Desempeño bioclimatico y eficiencia energetica	Se instalaron techos verdes en un edificio en donde Los resultados mostraron que, durante el periodo cálido, el techo verde redujo la ganancia de calor en un rango de 92% - 97% en comparación con los techos cerámicos y metálicos, respectivamente, y mejoró la pérdida de calor entre un 20% - 49%. Mientras que, durante el periodo frío, el techo verde redujo la ganancia de calor en un 70% - 84%, y redujo la pérdida de calor en un 44% - 52% en comparación con los techos cerámicos y metálicos	(Parizotto & Lamberts, 2011).
	REINO UNIDO	Desempeño de los sistemas de drenaje en la gestion de aguas pluviales.	Se estudiaron techos verdes donde El techo verde proporcionó 50,2% de retención de lluvia anual acumulada, con una retención volumétrica total equivalente al 30% durante los eventos significativos.	(Stovin, Vesuviano, & Kasmin, 2011).
EUROPA	PAISES BAJOS	Temperaturas exteriores extremas debido a las olas de frío y de calor.	Se comparo el comportamiento de los verdes respecto a otros techos en donde se evidencio que este ofrece mejores capacidades termicas a la hora de enfrentar eventos de frío y de calor.	(Folimi, Corpel, Solcerova, & Kluck, 2023).
	FINLANDIA	Inundaciones por aguas pluviales en distritos urbanos vulnerables.	Serealizo un estudio en donde los resultados mostraron que la implementación de techos verdes redujo las inundaciones en un 13 %.	(Twohig et al., 2022).
	SUECIA	Inundaciones generadas debido al aumento de las precipitaciones.	Implementación de techos verdes para prevenir inundaciones debido a las lluvias moderadas.	(Mourad et al., 2022).
	ITALIA	Inundaciones urbanas y adaptación a los cambios climaticos.	Mitigar inundaciones por medio de tachos verdes con vegetación CAM y vegetación C3.	(Cristiano et al., 2020).
	ESPAÑA	Ubicación y diseño que optimicen los servicios ecosistémicos.	Se realizo un modelo en donde los resultados indican claramente una ventaja de los techos verdes sobre las otras alternativas de diseño.	(Langemeyer et al., 2020)
ASIA	INDIA	Flujo de calor y reducción de cargas térmicas presentadas en edificios de 3 ciudades que presentan diferentes condiciones climaticas.	Al aplicar el techo verde, el modo básico de consumo de energía en las 3 ciudades disminuyó un 23 %, 12,5 % y 16,3 %.	(Rahimi et al., 2022)
	CHINA	Combatir la ola de calor de forma que las ciudades tengan un efecto refrescante.	Se realizo un análisis de regresión que reveló que por cada aumento de 1000 metros cuadrados en el área del techo verde, la LST promedio del techo y su zona amortiguadora de enfriamiento característica disminuyó en 0,4°C.	(Dong, y otros, 2020).
	COREA DEL SUR	Reducir la temperatura de los edificios ubicados en las áreas urbanas	Se instalo un techo verde en una escuela de Seúl arrojando como resultado que la temperatura de este en comparación con un techo convencional se redujo entre 5°C y 9°C.	(Shafique & Kim, 2017).
	SINGAPUR	Promover la implementación de los techos verdes.	Se realizo un proyecto en el cual se buscaba promover la construccion de techos verdes, luego de haber instalado y realizarle estudios a estos se evidencio que los contaminantes gaseosos ácidos dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno mostraron una reducción marginal después de las instalaciones.	(Tan & Sia, 2005).
	AUSTRALIA	Estudiar la calidad del agua de salida de los techos verdes intensivos y extensivos	se halló que el desagüe de los techos verdes puede proporcionar una fuente de agua alternativa para fines no potables, como el riego de jardines urbanos y la descarga de inodoros	(Razzaghmanesh, Beecham, & Kazemi, 2014).

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

2.2 Lineamientos y regulaciones internacionales

2.2.1 Directrices y normas en Europa

2.2.1.1 Alemania. Europa tiene varias décadas de experiencia con techos verdes y tiene un conjunto establecido de estándares y pautas para techos verdes. Este conocimiento se encuentra en una de las primeras pautas publicadas sobre techos verdes y que se conoce como *Vg* como las Directrices alemanas FLL para techos verdes (Catalano, Laudicina, Badalucco, & Guarino, 2018). Estas pautas fueron publicadas por el subgrupo Green Roofing de la organización alemana sin fines de lucro Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL), la cual es una comisión reguladora compuesta por un consorcio de expertos voluntarios de la industria, investigadores universitarios y profesionales experimentados. Las pautas son una medida para que los profesionales regulados, proveedores, instaladores y reguladores municipales o estatales, utilicen para aplicar técnicas precisas de la tecnología de techos verdes. No obstante, se reconoce que la aplicación de las pautas no garantiza resultados libres de fallas (Dvorak, 2011).

Los lineamientos FLL en su contenido abordan problemas estructurales y de peso en varios lugares, y brindan orientación para las consideraciones de carga de diseño y carga superficial, además proporciona listas de referencias cruzadas DIN (sistema de lineamientos europeo similar a ASTM) a consideraciones de carga estructural como cargas vivas, muertas, de viento y cargas de nieve y hielo. Estos lineamientos son muy importantes, pues la parte estructural es uno de los dominios más críticos para establecer el diseño y la construcción a largo plazo de techos verdes (Dvorak, 2011).

2.2.1.2 Suiza. La norma suiza SIA 312-SN 564312 de 2013 fue publicada por la Yui dkj gj & o g&k0 nkt dxuy&Gxw ozi zuy4Rg&uxs g&gi k&klkxt i o&g&g&G&7 &Pgxj d kx g&& vgoys u && yz &&G&8=78&k&??: &rgs gj g&Xk kxjki o dt zu&k&ki nuy &g& gr& k& perfeccionada en 2007. La SIA consta de cinco capítulos y tres anexos relacionados con el diseño y la construcción de reverdecimiento de techos mientras se hace referencia a otras normas SN y SIA para detalles técnicos y específicos como los parámetros del suelo y otros asuntos relacionados con la ingeniería (Catalano, Laudicina, Badalucco, & Guarino, 2018).

2.2.1.3 Italia. La norma italiana fue emitida por primera vez por la organización italiana de normalización (UNI) en 2007 y fue revisada en 2015. La UNI consta de 11 capítulos y 3 anexos sobre el diseño, la ejecución, el control y el mantenimiento de cubiertas, y se refiere a otras normas UNI para detalles técnicos específicos, por ejemplo, parámetros de membranas impermeables, mejoradores de suelos y sustratos (Catalano, Laudicina, Badalucco, & Guarino, 2018).

2.2.2 Directrices y normas en Norteamérica

Desde el año 2004 el subgrupo de techos verdes de ASTM ha publicado cinco documentos sobre techos verdes. Existe una guía estándar para la selección, instalación y mantenimiento de vegetación de techos verdes (ASTM E 2400 de 2006), una práctica estándar para determinar las cargas estructurales de los sistemas de techos verdes en condiciones secas y saturadas (ASTM E 2397 de 2005), un documento para determinar el peso saturado y el peso seco de medios de crecimiento (ASTM E 2399 de 2005), y dos documentos que cubren métodos

para probar tasas de permeabilidad al agua a través de materiales de drenaje (ASTM E 2396 de 2005 y ASTM E 2398 de 2005). Posteriormente, la National Roofing Contractors Association (NRCA) emitió el Manual de sistemas de techos verdes para satisfacer mejor la necesidad de la industria del techado de entender los techos verdes; el gobierno de Estados Unidos emitió el Whole Building Design Guide (WBDG) que incluye especificaciones para techos verdes en proyectos federales; el IBC desarrolló un lenguaje con respecto a los requisitos contra incendios y vientos para permitir el uso de techos verdes, pero los detalles son limitados; y el ANSI ha emitido un estándar para abordar las preocupaciones sobre incendios y vientos en los techos con vegetación (Dvorak, 2011).

Según las normativas norteamericanas, el conocimiento de cómo se unen los componentes de un sistema complejo se deja a la formación técnica o se adquiere a través de la práctica. Como los techos verdes siguen siendo un mercado emergente, existe la necesidad de desarrollar el conocimiento de diseño de los sistemas, así que Green Roofs for Healthy Cities organiza capacitación regional sobre techos verdes y tiene un programa de acreditación de techos verdes. No obstante, hay una gran necesidad de conocimiento sobre la aplicación de techos verdes en diversas ecorregiones (Dvorak, 2011).

Las referencias norteamericanas brindan orientación sobre el diseño de sistemas de techos verdes, pero varios libros sobre el tema brindan mejor cobertura de los conceptos relacionados con los sistemas y el conocimiento técnico. Sin embargo, existen estándares nuevos que abordan cuestiones relacionadas con los sistemas, los cuales las normas norteamericanas han sabido abordar muy bien como el documento VF-1 de ANSI, en el que se identifican varios

términos, definiciones y requisitos del sistema para los techos con vegetación (SPRI, 2017).

Cabe mencionar que, la norma FLL y este documento comparten conclusiones similares sobre el viento y el fuego, es decir, que los techos verdes correctamente diseñados y mantenidos pueden cumplir con los requisitos del código de resistencia al viento y al fuego.

2.2.2.1 Canadá. En 2009, la ciudad de Toronto (Canadá) introdujo la normativa "Green Roof Bylaw", que exige que entre el 20% y el 60% de la superficie del techo sea verde cuando se realicen nuevas construcciones o ampliaciones con una superficie bruta superior a 2000 m² (Hill et al., 2016).

2.2.3 Directrices y normas en Asia

2.2.3.1 China. El desarrollo de techos verdes en China apenas está comenzando, así que no hay una política relevante. El trabajo legislativo aún no ha comenzado y es muy importante observar la experiencia de los países desarrollados. En la actualidad, solo hay pocas publicaciones sobre la discusión de las políticas sobre techos verdes y los problemas que hay alrededor de estos (Xiao, Lin, Han, & Zhang, 2014).

Kt &g u866=8kks on &r&Vxui kj o dt zu&k& nkt dx g&gx&ki nuy&rgt zgju y &g& S ks hxgt g&s vks kghrk&gx&ki nuy&rgt zgju y&ut &kyozkt i o&g&g&kluxgi o t &k&g i ky 2g& cual respalda la tecnología para el desarrollo de techos verdes saludables. No obstante, estas leyes y reglamentos emitidos por el gobierno de China aún tienen inconvenientes que deben corregirse.

El primer inconveniente es que las leyes y reglamentos expedidos a lo largo de los años, resultan obsoletos al momento de la ejecución de proyectos de techos verdes, pues no permiten que las empresas se cualifiquen para implementar esta tecnología en sus construcciones, y no proporcionan las disposiciones legales relevantes.

El segundo inconveniente es la falta de material reglamentario e instructivo, pues si bien el área de nueva construcción en China es la número 1 cada año, el contenido de la regulación de techos verdes en China es muy simple. No hay una instrucción general y todos los materiales tienen distintas divisiones en el reverdecimiento del techo.

El tercer inconveniente es el desajuste en la tecnología y material obsoleto, aunque en algunas ciudades de China la ecologización de edificios se ha vuelto a gran escala se ha

2.2.3.2 Taiwán. En Taiwán, el movimiento hacia una sociedad baja en carbono y ciudades más sostenibles, así como las iniciativas para la sostenibilidad de edificios y campus, ha aumentado el número de techos verdes. Se han construido muchos techos verdes en Taiwán desde el año 2000, pero la mayoría no sigue un diseño estándar. No obstante, varias políticas han permitido su rápida adopción. Por ejemplo, el Ministerio de Educación lanzó un Programa Nacional de Campus Sostenibles en 2002 e invitó a presentar propuestas para reconstruir los campus de forma sostenible (Chen, 2013). Este proyecto tenía dos componentes principales: el primero era fomentar nuevas relaciones entre las escuelas y las comunidades locales, mientras que, el segundo componente era reformar los entornos del campus mediante el uso de electrodomésticos que ahorran energía, sistemas de reciclaje y reutilización de agua, pavimentos permeables, humedales artificiales, techos verdes, compost de follaje y desechos de cocina, entre otras prácticas.

El gobierno de la ciudad de New Taipei se ha dedicado a desarrollar una ciudad con bajas emisiones de carbono y una de sus estrategias para esto es construir más techos verdes y a partir del año 2011 el gobierno aprobó una regulación autónoma para aumentar el uso de instalaciones capaces de retener agua como es el caso de la tecnología green roof. Luego de la promoción de techos verdes por parte del gobierno de la ciudad de New Taipei, se comenzaron a seguir e implementar las regulaciones estandarizadas alemanas FLL (Chen, 2013). De hecho, en New Taipei se promueve principalmente el uso de la normatividad alemana, pues al tener 40 años de antigüedad se considera la más completa y detallada, por lo que muchos países alrededor del mundo la adoptan como guía para diseño y construcción de cubiertas verdes (Dong, Zuo, & Luo,

Development of a Management Framework for Applying Green Roof Policy in Urban China: A Preliminary Study, 2020).

2.2.3.3 Japón. Japón es uno de los líderes en tecnología de techos verdes. La falta de vegetación y el efecto de isla de calor urbano han hecho que las autoridades del gobierno local tomen acciones para mitigar este problema. En abril de 2001, se implementó el nuevo Plan Tokio 2000, el cual exigía que todos los edificios nuevos de más de 1000 m² debían tener un mínimo del 20% de techo verde (Catalano, Laudicina, Badalucco, & Guarino, 2018).

Para disminuir el efecto isla de calor urbano, el gobierno federal de Japón y varias ciudades ofrecen importantes incentivos para que los desarrolladores instalen fachadas verdes, paredes vivas y techos verdes. De hecho, desde el año 2002, la empresa Urban Green Tech organiza un concurso anual sobre tecnología ecológica especializada para tejados, revestimientos de paredes y nuevos espacios verdes (Catalano, Laudicina, Badalucco, & Guarino, 2018).

En Japón, para diseñar y construir techos verdes existen dos tipos de guías. La primera es la Neo Green Space Design, que contiene técnicas básicas para crear un espacio verde, tiene 4 tomos que contienen información diferente en cada uno de ellos. La segunda es la guía de tecnologías ecológicas para techos y paredes, donde se proporciona un resumen del desarrollo de tecnología de paredes y techos verdes (Ismail, Aziz, Nasir, & Taib, 2012).

2.2.4 Lineamientos y regulaciones en Oceanía

2.2.4.1 Directrices y normas en Australia. En Australia, la mayoría de las políticas (incluso las que se consideran exitosas), brindan solo una guía limitada sobre la instalación y el mantenimiento de proyectos GWGR (Green Walls Green Roofs). El apoyo a las políticas proviene principalmente del gobierno local, ya que es este nivel de gobierno el que se responsabiliza de las funciones relacionadas con la gestión de la tierra, la planificación del uso de la tierra, el desarrollo de políticas y el control del desarrollo en los lugares pertinentes. La guía

vxg>ut yx i i o t &k&ki nuy&kxj ky&t &G yz&g&k&y&kr&S gt gr&j&k&ki xyuy&gx&g&kr&oyk u&j&k&zk i nuy&kxj ky 4&kt &k&y&zk& gt gr&y&k&kyi xhkt &uy&kt kl&i&uy&j&k&uy&ki nuy&kxj ky&2uy&g&d&k&kt zky&

tipos de techos verdes que hay, las consideraciones de diseño paisajístico y arquitectónico, las tecnologías sostenibles de agua y energía, los problemas de mantenimiento y estudios de casos (Ismail, Aziz, Nasir, & Taib, 2012).

2.2.5 Lineamientos y regulaciones en Latinoamérica

2.2.5.1 Leyes Nacionales acerca de techos verdes en México. En México, la instalación de un sistema de naturación como una cubierta verde, este sistema debe cumplir con los requisitos o especificaciones técnicas, condiciones, parámetros y criterios mínimos de calidad y seguridad, aplicables a los materiales y procedimientos constructivos que para tal efecto sean utilizados durante los procesos de planeación, instalación y mantenimiento de los sistemas, los cuales deben estar en conformidad con lo que se establece en la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal en 2008 (Castillo, 2015).

Además, la Secretaría del Medio Ambiente junto a la Secretaría de Finanzas, brinda un beneficio fiscal del 10% en la reducción del impuesto predial a las personas que demuestren que son propietarias de inmuebles destinados a uso residencial y que instalen voluntariamente un sistema de cubierta verde en sus viviendas.

2.3 Análisis crítico.

Un panorama de optimismo y cuidado es el resultado de estudiar la sostenibilidad de los techos verdes a lo largo de todos los países que lo han experimentado. Los diversos estudios han arrojado resultados satisfactorios relacionados con la calidad de la temperatura, la calidad del aire, disminución de inundaciones, aprovechamiento inteligente de recursos hídricos, drenaje pluvial, optimización de servicios eco sistémicos, flujo de calor, calidad del agua de salida de los techos verdes y otros. El panorama también invita a considerar optimizar el uso de materiales para la elaboración de techos verdes con instrucciones y normatividad específica, variados lineamientos que han sido adoptados por los países conforme a la demanda de riesgos específicos que se han suscitado. Desde luego en cada país por sus especificaciones pluviométricas, las mismas consideraciones no pueden ser comunes así la planeación, instalación y mantenimiento de los techos verdes difiere. Ha sido igualmente en algunos países una política el propiciar el uso de techos verdes, consabido a que los beneficios de los tales, solucionan problemáticas urbanas de mayor riesgo. Es curioso apuntar que los países más desarrollados tecnológicamente han dado el visto bueno a esta buena práctica ecosistémica.

Sigue siendo de estudio el escoger la vegetación apropiada, usar los materiales apropiados y configurar un modelo de construcción instruccional unificado. La experiencia y el

estudio referencial de estudios anteriores es lo que facilita concretar mejores formas para alcanzar esta meta. Los países líderes en esta práctica son los que dan puntadas para alistar un procedimiento ideal para construir techos verdes, Estados Unidos, Japón y Taiwán son referentes a considerar en este aspecto. Para la latitud suramericana el asunto aún está alejado de la realidad y el mercado emergente se concentra en las capitales principales, donde aún no hay normatividad ni lineamientos específicos y los que asumen el reto lo hacen por motivos más de arquitectura innovadora o alguna conciencia ambientalista.

Capítulo 3. Estudios sostenibles a nivel nacional que emplearon techos verdes.

En este capítulo se aborda analíticamente los estudios realizados en Colombia para la implementación de techos verdes como alternativa constructiva sostenible.

3.1 Casos de investigación

3.1.1 Caso de Bogotá.

Esta investigación tenía como objetivo examinar la influencia de un techo verde en la regulación de la temperatura sobre la cubierta de un edificio en la ciudad de Bogotá. También se busca identificar el posible impacto que pueda tener el techo verde sobre la longevidad de la impermeabilización en la cubierta, ya que convencionalmente los tejados o cubiertas sufren muchos daños, debido a las grandes fluctuaciones de temperatura y humedad. De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se puede concluir que, debido a la sombra generada por la vegetación, las temperaturas medidas en la superficie del sustrato bajo diferentes tipos de plantas (como los helechos), más bajas que las medidas sobre la superficie de la grava. La máxima disminución de temperatura causada por la vegetación fue alrededor de 25°C. Por otro lado, la transferencia de calor a través del techo de grava fue mayor que a través del techo verde, mientras que la superficie exterior de la cubierta con techo verde tuvo una menor ganancia de calor. Teniendo en cuenta los resultados, implementar techos verdes en zonas urbanas que tienen climas similares al de Bogotá, puede representar una disminución en las cargas térmicas para edificios grandes, reduciendo de igual manera el consumo de energía eléctrica, pues los equipos mecánicos usarán menos energía para enfriar o acondicionar el espacio interior. Además, se

evidenció que los techos verdes cumplen un papel importante dentro de los recubrimientos para edificios, aumentando la longevidad de las impermeabilizaciones en las cubiertas (Reyes, 2014).

3.1.2 Caso de Bogotá, localidad: Chapinero.

En los últimos años el aumento en la industria de la construcción se relaciona directamente con la capacidad de drenaje del agua de lluvia, dado al incremento de las superficies impermeables en la ciudad. (Contreras-Bejarano & Villegas-González, 2019).

El desarrollo de tecnologías sustentables es propuesto a través del estudio de un prototipo, entendido como una fase real del diseño a través de la construcción y ejecución de pruebas experimentales (Kroes, 2012). Se espera que esta investigación contribuya a potencializar los beneficios de los techos verdes en pro de la sociedad, y que se considere como un ejemplo para ciudades que posean problemáticas, como las que presentan algunas comunidades de la ciudad de Bogotá. (Contreras-Bejarano & Villegas-González, 2019).

Esta investigación consta de dos fases en las cuales se pretende investigar un mecanismo que contribuya a la reducción paulatina de eventos de inundación urbana y aporte al manejo integral del recurso hídrico en la zona norte de la localidad de Chapinero a través de dos estrategias constituidas por modelación computacional, en donde se espera analizar la variación de la inundación urbana con la implementación de techos verdes; y por modelación física, con la cual se pretende analizar el comportamiento de las características de calidad y retención de agua de lluvia con diferentes alternativas de techos verdes. (Contreras-Bejarano & Villegas-González, 2019).

En la primera fase se presenta el modelo conceptual de la problemática en estudio, en donde se evalúan las condiciones de inundación de la ciudad de Bogotá, situando la zona de afectación propicia para la instalación de techos verdes. Posteriormente se describe el modelo computacional llevado a cabo en el software SWMM, a partir de la modelación de cada elemento (precipitación, techos convencionales, techos verdes y sistema de alcantarillado pluvial) y la relación entre ellos (precipitación-techo, relación entre techos contiguos y techo-sistema de alcantarillado pluvial), consolidando la primera fase de la investigación. La simulación mediante un modelo físico constituye la segunda fase, en donde se analizan las condiciones de retención y calidad del agua de lluvia antes y después de ser filtrada por diferentes composiciones de techos verdes y un filtro de arena. (Contreras-Bejarano & Villegas-González, 2019).

Como resultados de la modelación por medio del software SWMM, la inundación modelada tiende a atenuarse al implementar los techos verdes como solución, sin embargo para grandes eventos de inundación no sería suficiente solamente la implementación de los techos verdes, por otra parte, se ensayaron diferentes sustratos, dando como resultado que características como la conductividad, resistividad, salinidad, sólidos en suspensión y contenido de oxígeno permanecen constantes después del filtrado (citar), no obstante su pH tiende a disminuir, El aserrín y la arena como materiales alternativos fueron eficientes en el control del nivel de pH presente en el agua de lluvia. (Contreras-Bejarano & Villegas-González, 2019).

3.1.3 Caso de Bogotá, localidad: Fontibón.

Las urbanizaciones han producido diversos impactos sociales, ambientales e hidrológicos, como reducción de la biodiversidad, aumento de las temperaturas urbanas,

degradación de los ecosistemas, contaminación del aire y del agua, cambios en los procesos hidrológicos, alteraciones en la recarga de las aguas subterráneas, aumento de la prevalencia de inundaciones, remoción de vegetación y aumentos potenciales de suelos inestables. Encontrar soluciones para mitigar los impactos de la urbanización es de vital importancia en el desarrollo y la planificación de las ciudades, y en particular para los países en desarrollo. (Bautista & Peña-Guzmán, 2019).

Una estrategia que está cobrando impulso es el uso de techos verdes y áreas verdes más grandes (mayor cobertura verde bajo los árboles, con el fin de aumentar el área permeable) para el control de la escorrentía. (Bautista & Peña-Guzmán, 2019).

Para este estudio se realizó una simulación utilizando el software i-Tree Hydro donde se involucró la cuenca urbana en la zona de Fontibón de Bogotá, (citar) se muestran los resultados de cinco simulaciones de caudales de escorrentía de esta localidad, ya sea con aumento o reducción del número de áreas impermeables, las zonas seleccionadas fueron zonas donde hay pocos parques y gran número de población, además de esto las inundaciones son bastante frecuentes. (Bautista & Peña-Guzmán, 2019).

Dando como resultado que las implementaciones de los techos verdes en la tercera simulación redujeron la escorrentía máxima en un 50%, además se consideró que es de vital importancia para mejorar la calidad de vida de los residentes ya que se mejora la calidad del aire, agua de escorrentía y reducen la temperatura del aire. (Bautista & Peña-Guzmán, 2019).

3.2 Lineamientos y regulaciones en Colombia

3.2.1 *Guía de techos verdes de Colombia*

Para realizar el diseño de los techos verdes en Colombia se utiliza como base la guía de techos verdes de Bogotá. En esta guía se encuentran diferentes aspectos referentes a la instalación y mantenimiento a tener en cuenta de un techo verde. En esta guía se mencionan algunos de los beneficios ambientales y económicos que se pueden obtener al realizar la construcción de una estructura de techos verdes. Además, esta guía describe cinco tipos de sistemas para techos verdes de acuerdo a la tecnología empleada, los cuales son: sistema tipo multicapa monolítico, sistema tipo multicapa elevado, sistema tipo receptáculo, sistema tipo monocapa y sistemas aeropónicos. También muestra los requisitos mínimos que se deben tener en cuenta para implementar cada una de las funciones que debe tener un techo verde en Bogotá y las características mínimas de desempeño requeridas con relación al techo verde a implementar (Velandia & Quiroz, 2021).

Entre los beneficios ambientales que menciona la guía de techos verdes para Bogotá y que se pueden extrapolar a otras ciudades de Colombia, se tienen: el manejo sostenible de las aguas lluvias, reduciendo el volumen de esorrentía y atenuando el caudal; mitiga el efecto de la isla de calor y reconstituye el equilibrio climático, refrigera los espacios mediante el proceso de evapotranspiración de la vegetación y evaporación del agua retenida en otras capas del sistema; reconstituye el paisaje natural aumentando las zonas verdes; fomenta la biodiversidad creando un hábitat natural para especies vegetales y animales; y mejora la calidad del aire, pues captura el dióxido de carbono, las partículas en suspensión y otros compuestos contaminantes y emisión de oxígeno (Secretaría Distrital del Ambiente, 2011).

Además, algunos de los beneficios económicos que los techos verdes pueden ofrecer según la guía son: aumento de la durabilidad de la cubierta y de la capa de impermeabilización; incremento del valor comercial del edificio; reducción del consumo energético y costos de operación; presentación de técnicas adicionales, pues son un medio captador y filtrante de agua lluvia y aumenta la eficiencia de sistemas fotovoltaicos; productividad y posibles beneficios tributarios y otros incentivos públicos como descuentos tributarios por control ambiental y manejo sostenible del agua lluvia (Secretaría Distrital del Ambiente, 2011).

3.3 Cuadro Resumen

Tabla 5

Tabla resumen

UBICACIÓN	PROBLEMÁTICA	SOLUCIÓN	FUENTE
BOGOTÁ	Temperatura e impactos que se producen en la cubierta de un edificio donde se implemento un techo verde de la ciudad de Bogotá.	Teniendo en cuenta los resultados, implementar techos verdes en zonas urbanas que tienen climas similares al de Bogotá, puede representar una disminución en las cargas térmicas para edificios grandes, reduciendo de igual manera el consumo de energía eléctrica, pues los equipos mecánicos usarán menos energía para enfriar o acondicionar el espacio interior. Además, se evidenció que los techos verdes cumplen un papel importante dentro de los recubrimientos para edificios, aumentando la longevidad de las impermeabilizaciones en las cubiertas	(Reyes, 2014).
BOGOTÁ	Reducción paulatina de las inundaciones y aporte al manejo integral de los recursos hídricos.	Se realizó el modelado por medio del software SWMN donde los eventos modelados (inundación) tienden a atenuarse al utilizar techos verdes como solución.	(Contreras-Bejarano & Villegas-González, 2019).
FONTIBÓN	Impactos ambientales, hidrológicos, reducción de la biodiversidad, degradación de los ecosistemas, contaminación del aire y del agua, aumento de las inundaciones producto de la urbanización que esta sufriendo la ciudad.	Se realizó una simulación utilizando el software i-Tree Hydro, Dando como resultado que las implementaciones de los techos verdes en la tercera simulación redujeron la escorrentía máxima en un 50%, además se consideró que es de vital importancia para mejorar la calidad de vida de los residentes ya que se mejora la calidad del aire, agua de escorrentía y reducen la temperatura del aire.	(Bautista & Peña-Guzmán, 2019).

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

3.4 Análisis crítico.

El concepto de techos verdes aún es muy incipiente en nuestro país y es Bogotá la capital, quien ha dado los primeros pasos en la práctica de esta iniciativa ecológica. Por lo mismo, pocos estudios nacionales referenciales se tienen en este orden y es de inmediato una recomendación más para invitar a hacer de esta práctica una forma de explorar y difundir este valioso conocimiento.

Interesante destacar que las guías y orientaciones para la construcción de techos verdes en Bogotá, además de recoger ya toda la valiosa y asertiva información internacional, propone formas interesantes que van desde lo económico en su construcción hasta las presentaciones de técnicas prácticas novedosas para su construcción de la mano de descuentos tributarios por control y manejo del agua en el plan de Colombia capital de vida.

Capítulo 4: Análisis del agua pluvial tratada para sistema de riego.

En este capítulo se brindan alternativas para emplear sistemas de riego con agua previamente tratada a través de techos verdes.

La capacidad de los techos verdes para controlar la escorrentía de aguas pluviales está bien documentada en la literatura científica, pues es una problemática importante que enfrentan la mayoría de las áreas urbanas. Además, la escorrentía de aguas pluviales contribuye a la mala calidad del agua superficial, debido a los grandes volúmenes de agua generados, y si bien las áreas urbanas tienen alcantarillas separadas o un sistema de alcantarillado combinado, estos sistemas se desbordan frecuentemente durante las tormentas; provocando que grandes cantidades de aguas residuales sin tratar se descarguen en los cuerpos de agua superficiales (Hardin, Wanielista, & Chopra, 2012).

La escorrentía de aguas pluviales en alcantarillas separadas o combinadas puede contaminarse de varias maneras, como el contacto con materiales de techo corroídos y depositados, el contacto con partículas en las carreteras y el contacto con fertilizantes y pesticidas de césped y tierras agrícolas (Pamuru, Forgione, Croft, Kjellerup, & Davis, 2021). Una solución sostenible para el tratamiento del agua de escorrentía del techo es el uso de un sistema de tratamiento de aguas pluviales de techo verde.

4.1 Calidad del agua para sistemas de riego

La capacidad disolvente del agua es la que le permite enriquecerse al entrar en contacto con los minerales del suelo, convirtiéndose en un factor determinante para la nutrición de las plantas, que la requieren para sobrevivir y realizar todas sus funciones vitales y para abastecerse de ella, la mayoría de las plantas recurren al agua retenida en el suelo, absorbiéndola a través de las raíces y trasladándola a sus tallos y hojas donde se evapora por transpiración, para regresar de esta manera a la atmósfera.

Los elementos que contiene el agua deben corresponder a las necesidades fisiológicas de las plantas, independientemente de su fuente de abastecimiento, que pueden favorecer o perjudicar al desarrollo vegetal. Las necesidades de las plantas son las que deben tomarse como parámetros de referencia para evaluar la calidad del agua (Deng, 2021).

4.2 Parámetros de calidad del agua para riego

La evaluación de la calidad del agua para riego no puede llevarse a cabo como la evaluación del agua para el abastecimiento de poblaciones, pues existe una íntima relación e interacción entre el agua, el cultivo, el suelo y el clima, así que requiere de un tratamiento único y básico, debido a la variabilidad de los factores y la influencia de cada uno de ellos.

La calidad del agua para riego se determina por su composición y concentración de los constituyentes que pueda contener en solución o suspensión, adquiridos durante su transporte desde los puntos de precipitación e infiltración hasta donde es utilizada. Esta calidad es determinante en el comportamiento de los suelos y de los cultivos en los aspectos relacionados

con la salinización, la dispersión o destrucción de la estructura, el depósito de sedimentos y la diseminación de plagas y enfermedades fungosas.

Las características generales que determinan la calidad del agua para riego son:

1. La concentración total de sólidos en suspensión (sedimentos de origen erosivo): En relación con los sedimentos sólidos en suspensión no existen valores límites; en general debe tratarse de usar agua para riego lo más limpia posible, con el objetivo de evitar la formación de un depósito de material sobre el suelo agrícola. Para evitar sedimentos en la zona de riego se utilizan estructuras hidráulicas sobre los canales, conocidas como decantadores o desarenadores, los cuales consisten en expansiones bruscas del área por donde circula el agua de tal manera que se disminuye drásticamente la velocidad del flujo. De esta manera las partículas en suspensión tienen la oportunidad de decantar hacia el fondo de la estructura, la cual debe limpiarse de forma periódica (Tovar, 2022).
2. La concentración total de sales solubles: La concentración total de sales solubles en las aguas de riego para fines de diagnóstico y de clasificación se pueden expresar en términos de conductividad eléctrica. Casi todas las aguas que se usan para riego tienen conductividad eléctrica menor de 2.250 mmhos/cm. Usualmente se usan aguas de mayor conductividad eléctrica, pero los rendimientos de los cultivos regados con estas aguas no son satisfactorios. Se ha comprobado que la conductividad eléctrica del extracto de saturación de un suelo, en ausencia de acumulación de sales provenientes del agua subterránea, normalmente es de dos a diez veces mayor que la correspondiente al agua con que se ha regado, como resultado de la extracción continua de humedad por las raíces

y la evaporación. Por lo que el uso de aguas entre moderada y altamente salinas puede ser la razón por la que se desarrollan condiciones de salinidad en el suelo, aunque tengan un drenaje satisfactorio (Tovar, 2022).

3. La concentración relativa de sodio en relación con otros cationes: Así como es importante la concentración de sales, también es importante la proporción relativa de sodio y cationes divalentes en el agua de riego, por su efecto sobre la sodificación del suelo. La importancia de este proceso radica en el efecto dispersante que tiene el sodio al ser intercambiado por los coloides del suelo, gracias a su elevado grado de hidratación. Cuando un suelo sufre dispersión por efecto del sodio, su estructura, la ordenación espacial de las partículas del suelo, se ve alterada con diferentes grados de intensidad, sellándose total o parcialmente la superficie del suelo a la infiltración del agua de riego e impidiendo el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el perfil del suelo. El peligro de sodificación del suelo está determinado por la relación entre el sodio y los iones divalentes, expresada en un índice conocido como relación de absorción de sodio o RAS.

La clasificación de las aguas de riego con respecto al RAS se basa en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre la condición física del suelo. Sin embargo, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos cuando los valores del sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para deteriorar la condición física del suelo (Tovar, 2022). Un exceso de sodio produce sequedad o quemaduras en los bordes exteriores de las hojas, y los cultivos más sensibles al exceso de sodio en el suelo son los cítricos, el aguacate y las judías.

4. La concentración de Boro u otros elementos tóxicos: El boro se encuentra en casi todas

las aguas de riego y su concentración varía desde trazas hasta varias partes por millón. Aunque es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas se convierte en un tóxico cuando excede su nivel óptimo, el cual ha sido establecido de 0,03 a 0,04 ppm para la mayoría de cultivos. No obstante, la concentración que afecta a algunas especies es óptima para otras. Un ejemplo de esto último es el limonero, el cual muestra daños económicos significativos si se riegan con aguas con más de 1 ppm de boro, mientras que la alfalfa logra su máximo desarrollo si el agua de riego posee entre 1 y 2 ppm de boro (Tovar, 2022).

5. La dureza del agua, es decir, la concentración de bicarbonatos en relación con los cationes divalentes: En aguas ricas en bicarbonato, el calcio y el magnesio tienden a precipitar en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Esta reacción no se completa totalmente en circunstancias ordinarias, pero en la medida que se produce las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando así la proporción relativa de sodio (Tovar, 2022).
6. La presencia de semillas de malezas, esporas de hongos patógenos y huevos o larvas de insectos: La presencia en el agua de riego de semillas de malezas, esporas de hongos y otros constituyentes fitopatógenos se incrementa a medida que el agua es transportada hasta los lugares donde será usada para el riego, o cuando es utilizada más de una vez regar en el valle. El problema de diseminación de malezas es bastante significativo en ciertas regiones y cultivos, como el caso del género *Phytophthora* en algunos frutales. El uso de mallas y decantadores significa una solución apreciable del problema de diseminación de malezas en el agua de riego (Tovar, 2022).

4.3 Estado del arte sobre los sistemas de riego

La irrigación consiste en regar cultivos trayendo agua de tuberías, canales, rociadores u otros medios hechos por el hombre, en lugar de solo depender del agua de lluvia. Los lugares que no tienen lluvias constantes no podrían sustentar la agricultura sin la irrigación, y en el caso de las áreas que tienen precipitaciones irregulares, el riego mejora el crecimiento y la calidad de los cultivos. El riego también crea suministros de alimentos más confiables, pues permite que los agricultores cultiven en un horario constante (Jones, 2023).

4.4 Historia de los sistemas de riego

En la antigüedad, muchas civilizaciones en muchas partes del mundo practicaron el riego. Se cree que la forma más antigua de irrigación probablemente involucraba a personas que cargaban cubos de agua de pozos o ríos para verterla en sus cultivos (Zhang, Lin, Zhang, & Ge, 2021). A medida que se desarrollaron nuevas y mejores técnicas, las sociedades de Egipto y China construyeron canales de riego, represas, diques e instalaciones de almacenamiento de agua. El imperio romano construyó estructuras llamadas acueductos para transportar agua del deshielo en los Alpes a ciudades y pueblos en los valles de abajo. Esta agua se utilizaba para beber, lavar y regar (National Geographic, 2023).

Los sistemas de riego modernos utilizan depósitos, tanques y pozos para suministrar agua a los cultivos. Los embalses incluyen acuíferos, cuencas que acumulan nieve derretida, lagos y cuencas creadas por represas. Los canales o tuberías llevan el agua desde los embalses hasta los campos. Los canales y tuberías, al igual que los antiguos acueductos romanos, a menudo

dependen de la fuerza de gravedad, pero las bombas también pueden mover agua de los embalses a los campos (National Geographic, 2023).

4.5 Clasificación de los sistemas de riego

- **Riego por aspersión:** se basa en la aplicación del agua en forma de lluvia sobre la toda superficie, el agua pasa por una red de tuberías hasta llegar a los aspersores encargados de dispensarla. Es un sistema muy utilizado en superficies grandes, ya que combinados la presión y el caudal adecuados puede llegar a superficies de entre 6m a 14 m. El riego por aspersión realiza movimientos rotatorios que humedecen una zona más o menos circular en diferentes pasos sobre ésta. Entre los aspersores podemos encontrar diversos tipos, como los aspersores emergentes, que salen cuando se activan y se esconden cuando se apagan, y los aspersores móviles, que se colocan en la boca de la manguera y se fijan en el suelo. Este tipo de riego bien diseñado, calculado e instalado, permite una distribución uniforme por toda la superficie del jardín, y es el tipo más común para riego de césped (Cruz & Salas, 2020).
- **Riego con difusores:** Los difusores son similares a los aspersores, pero se usan en superficies más reducidas, ya que tienen un alcance de 3 m a 7m. Este tipo de riego actúa mojando un arco de riego que se regula desde la boca de salida del agua. Los difusores se utilizan en el riego de superficies pequeñas de césped (Cruz & Salas, 2020).
- **Riego por goteo:** Este es uno de los sistemas de riego más ecológicos e ideal para zonas donde el agua es escasa. El agua sale por unos orificios llamados goteros y

llega a la misma base de las plantas, no encharca el terreno así que se evita el desperdicio de agua. Si se va a instalar un sistema por goteo se debe revisar que los emisores no se atascen con la cal y las impurezas, y es un sistema recomendado para macizos, jardineras y parterres de plantas (Cruz & Salas, 2020).

- Cintas de exudación: Son tuberías de material poroso que distribuyen el agua de manera continua a través de los poros de tal manera que se forma una línea continua de humedad que las hace muy recomendadas para el riego de plantas en línea, humedecen una gran superficie y es especialmente interesante en suelos arenosos. Se puede utilizar en el riego de árboles también (Cruz & Salas, 2020).
- Riego subterráneo: Se trata de cañerías perforadas que se entierran en el suelo a una determinada profundidad entre 5 cm a 50 cm. El funcionamiento es el mismo que el del riego por goteo, con la diferencia de que la tubería no se ve porque está enterrada y el agua está en contacto directo con las raíces (Cruz & Salas, 2020).
- Riego con manguera: las mangueras de riego se usan en pequeñas superficies. Este tipo de riego es el menos recomendable, porque desaprovecha muchísima agua y no provee de una buena uniformidad, ya que en unos lugares cae más agua que en otros (Cruz & Salas, 2020).

Todos los sistemas de riego anteriores (excepto el riego con manguera), pueden ser automatizados mediante la instalación de un programador de riego.

4.6 Calidad del agua de los techos verdes: Una revisión

Los techos verdes se han utilizado durante varias décadas en muchas partes del mundo, pues ofrecen un enfoque único y sostenible para la gestión de aguas pluviales. En este apartado, se presenta evidencia sobre la retención de agua en un sistema de techo verde y los factores que influyen en la calidad del agua recolectada. Además, se tiene como objetivo determinar si el agua retenida por un techo verde puede ser utilizada de forma no potable.

4.7 Almacenamiento en cisterna como forma de tratamiento de aguas pluviales

Un sistema de tratamiento de aguas pluviales de un techo verde se define como un techo verde irrigado con una cisterna para almacenar el filtrado del techo verde que se utilizará para el riego. Además, un techo verde con una cisterna para reutilización ofrece una solución de tratamiento sostenible y estéticamente agradable que utiliza el espacio no utilizado para tratar y almacenar la escorrentía de aguas pluviales. Este sistema incluye un techo verde con su sistema de drenaje conectado a una cisterna, la cual a su vez suministra agua de riego a la cubierta de una bomba. También se conecta una fuente de agua suplementaria a la cisterna para proporcionar agua en caso de que no haya suficiente agua para realizar el evento de riego. Esta fuente suplementaria puede ser agua potable o, siempre que la calidad del agua sea aceptable para fines de riego, aguas grises o pluviales de un estanque cercano. La bomba puede ser eléctrica o solar según las condiciones del sitio y los objetivos del proyecto. El riego se gestiona a través de un controlador, similar a lo que se usa ampliamente para el riego del césped doméstico.

Reciclar la escorrentía de aguas pluviales e irrigar el techo verde con agua almacenada mejora los factores hidrológicos relacionados, como la evapotranspiración, la capacidad de

filtración y retención de agua de las plantas y los medios, y reduce en gran medida el volumen de escorrentía de aguas pluviales que sale del sitio. Para lograr esto, es necesario usar una cisterna para almacenar el agua entre riegos.

Se realizó un estudio en la University Central of Florida, donde se instrumentó un techo irrigado para cuantificar la cantidad de agua de la escorrentía que sale del techo, además de centrar su atención en la calidad del agua. El sistema construido consistió en un techo verde de regadío con una cisterna para almacenar y reutilizar las aguas pluviales para irrigación. La preocupación principal relacionada con la calidad del agua es que los nutrientes como el nitrógeno y algunas especies de fósforo, pues se sospecha que estos contaminantes se filtran fuera de los sustratos de cultivo para techos verdes y de la lluvia.

Según los resultados de esta investigación, se determinó que el diseño óptimo de un techo verde para tratamiento de aguas pluviales para mejorar la calidad del agua es usar vegetación, usar una cisterna para almacenaje y reutilizar el agua para irrigación, y usar una capa del medio Black and Gold debajo de los medios de cultivo de arcilla expandida. El uso de la vegetación ayudará a reducir el total de concentraciones de fósforo, ortofósforo, TKN (nitrógeno total Kjeldahl) y nitrógeno total. El uso de la capa de migas de neumáticos Black and Gold ayudarán a reducir las concentraciones de fósforo total y ortofósforo mientras que la capa de sustrato de cultivo de arcilla expandida en la parte superior promueve una planta vigorosa. El uso de la cisterna promoverá la desnitrificación y reducirá en gran medida el volumen de escorrentía que sale del sistema, reduciendo así la masa de todos los contaminantes que salen del sistema. Por

medio de este diseño se va a promover el crecimiento saludable de las plantas mientras mantiene una mejor calidad del agua de la escorrentía de agua pluviales (Berretta, Poë, & Stovin, 2014).

4.8 Factores que afectan la calidad del agua de la escorrentía de los techos verdes y el transporte de contaminantes

Los factores que influyen en la escorrentía de los techos verdes se pueden resumir de la siguiente manera:

- Tipo de material utilizado: composición del suelo, material de drenaje y/o material subyacente del techo duro, material de tuberías de lluvia
- Espesor del suelo
- Tipo de drenaje
- Mantenimiento/productos químicos utilizados
- Tipo de vegetación, temporada (biomasa usando nutrientes)
- Dinámica de la precipitación
- Dirección del viento
- Fuentes locales de contaminación
- Propiedades físico-químicas de los contaminantes

Los contaminantes más comunes de la escorrentía de aguas pluviales urbanas son los metales pesados, hidrocarburos de petróleo, pesticidas, sólidos en suspensión, nutrientes y microorganismos patógenos. Los contaminantes estudiados en la escorrentía de los techos verdes suelen ser algunas formas de fósforo y nitrógeno, y metales pesados.

La pregunta clave con respecto a la calidad de la escorrentía de los techos verdes es: ¿Cuánto contribuye el techo verde a aumentar/disminuir la carga de contaminación de la escorrentía urbana? La respuesta se presenta de forma diferente por muchos autores. Algunos comparan la concentración de contaminantes en el agua de entrada (agua de lluvia) y el agua de salida (agua de escorrentía). En ese caso, la reducción de contaminantes significa que las concentraciones de contaminantes de salida son más bajas que las de entrada para los eventos de lluvia que fueron considerados. Así que, un techo verde se considera fuente de contaminantes si las concentraciones de agua de escorrentía son superiores a las concentraciones de agua de entrada.

4.8.1 Fósforo

El agua de precipitación generalmente contiene fósforo en concentraciones muy pequeñas. La escorrentía urbana puede estar contaminada por fósforo procedente, por ejemplo, de fertilizantes utilizados en la jardinería urbana, excrementos de pájaros y excrementos de animales. Los techos verdes establecidos con tierra enriquecida con nutrientes en forma de compost o de fertilizantes artificiales, y los techos verdes que están siendo fertilizados son comúnmente una fuente de fósforo. Algunos estudios encuentran que las concentraciones de fósforo total en el agua de escorrentía de los techos verdes son significativamente más altas que las concentraciones de fósforo fosfato y concluyen que, con respecto a los fosfatos, la reducción de cargas depende de la reducción del volumen de agua dentro del techo verde. También se observa que la reducción de la carga de fósforo fosfato aumenta con el tiempo. Durante cuatro años consecutivos se observaron los siguientes grados anuales de reducción de la carga de fósforo fosfatado: 26%, 61%, 64% y 80% (Berndtsson, 2010). Esto se atribuye al desarrollo de la

vegetación, pero también puede estar relacionado con la edad del techo y la subsiguiente pérdida anual de fósforo del suelo. Es por esto que la fuga de fosfato de un techo verde puede vincularse con la edad del techo y las rutinas de fertilización que tenga.

4.8.2 Nitrógeno

Diversos estudios indican que las concentraciones de varias formas de nitrógeno son más bajas en la esorrentía de los techos verdes que en el agua de lluvia, mientras que otros encuentran una liberación sustancial de nitrógeno de los techos verdes. Las concentraciones de nitrógeno en la esorrentía de los techos verdes se pueden vincular con el tipo de suelo, la edad del techo verde y el mantenimiento (uso de fertilizantes). Para techos extensos con vegetación estudiados en el sur de Suecia, se encontró que, generalmente, el nitrógeno nítrico es retenido por la vegetación y el suelo. Si se comparan las concentraciones de nitrógeno en forma de amoníaco en la precipitación y la esorrentía de los techos, estas últimas son considerablemente menores. Sin embargo, las concentraciones de nitrógeno total en la lluvia y en el agua de esorrentía de los techos con vegetación fueron muy similares. También se postuló que el nitrógeno orgánico puede ser liberado de los techos con vegetación. Por otro lado, se descubrió que, para las lluvias intensas los techos verdes no causaron un aumento de la concentración de nitrógeno total que fue lo mismo en las lluvias y la esorrentía de los techos verdes. No obstante, al estudiar un techo intensivo en Japón, construido con suelo inorgánico liviano, se encontró que el techo verde contribuyó a la disminución sustancial del nitrógeno total en la esorrentía.

Kt &kyz jcu&X t ull& zk&w gt zl > j&w groz &cus &mkkt &aul& yzs y &k& observó una liberación sustancial de nitrógeno total de los techos verdes estudiados, y las concentraciones

de nitrato variaron entre los diferentes sistemas de drenaje y suelo, y el más delgado mostró la liberación más alta, tomando valores entre 0,22 ppm y 22,7 ppm (Monterusso, Rowe, Rugh, & Russell, 2004). Se observó también un aumento en la descarga de nitrógeno de nitrato entre el primer y segundo muestreo que se realizó a los 140 y 314 días después de la fecundación, respectivamente. Se concluyó que, la liberación de nitrato depende del tipo de planta y del establecimiento en parcelas de techo con vegetación y fue menor para las parcelas con plantas nativas, seguidas de las parcelas con sedum plugs; la liberación más alta se observó para los sistemas de semillas de sedum (Monterusso, Rowe, Rugh, & Russell, 2004). Por último, la reducción observada de las cargas de nitrógeno nitrato en la esorrentía de los techos verdes: la reducción de las cargas dependía de la reducción del volumen de agua.

4.8.3 Metales pesados

Los estudios disponibles indican que no hay una liberación sustancial de metales la vegetación pesados de los techos verdes extensivos. Generalmente, el suelo delgado de los techos verdes extensos no muestra influencia en la calidad de la esorrentía y las concentraciones encontradas en el agua de esorrentía son las mismas que las concentraciones en la precipitación. Sin embargo, si se considera el volumen de esorrentía reducido, los techos verdes generalmente reducirían las cargas de metales pesados en la esorrentía urbana. Las concentraciones de metales pesados en la esorrentía de techos verdes son generalmente más bajas que las concentraciones de metales pesados en la esorrentía urbana de superficies duras (Berndtsson, 2010).

4.8.4 pH

Los techos verdes influyen en la calidad de la esorrentía al aumentar el pH de valores entre 5 y 6 (en agua de lluvia) a más de 7 y 8 (en agua de esorrentía de techos verdes). Esta es una función importante, pues contribuye a reducir el grado de acidificación de los recipientes naturales de agua. Los techos verdes están mitigando la lluvia ácida leve (Berndtsson, 2010).

4.8.5 Primer lavado

Es normal que la esorrentía inicial de las superficies impermeables después de un período seco esté más contaminada que la esorrentía posterior. Durante la sequía, las superficies de los techos se contaminan con partículas atmosféricas y desechos como hojas, excrementos de pájaros y vegetación. Estos se lavan con la primera lluvia, y se reconoce que la primera esorrentía generalmente tiene una calidad más baja. Con respecto a los techos verdes, no se esperaría el efecto de primer flujo con respecto a los contaminantes provenientes del propio techo con vegetación, ya que la misma fuente proporcionaría contaminantes durante todo el evento de lluvia-esorrentía. Sin embargo, ~~kt & k&yz j ou&X t ull& zk&w gt zl > j&w groz &us & m&kt &aul& y&ks y &e~~ se encontraron concentraciones más altas de una serie de componentes estudiados (fósforo total, nitrógeno amónico, nitrógeno nítrico, zinc y cobre) en las primeras muestras de esorrentía que en las muestras tomadas a mayores profundidades de esorrentía. Esto se interpreta como la ocurrencia de un efecto de primera descarga. El potasio y el carbono orgánico disuelto no muestran ningún efecto de primer lavado. ~~S dt zgy&w k&kt &~~Storm water runoff mitigation using a green roof ~~2u&y& z&xy&n~~ midieron los siguientes parámetros de calidad de esorrentía de techos verdes: fósforo, sulfato, nitrógeno, DQO (demanda química de oxígeno), pH y turbidez. No encontraron signos de un efecto de primera descarga.

4.8.6 Relación entre la fertilización, la contaminación por escorrentía y el desarrollo de la vegetación

La liberación de nutrientes de los techos verdes puede estar directamente relacionada con el uso de fertilizantes en el mantenimiento de un techo verde. El uso de fertilizantes convencionales provoca mayores concentraciones de nutrientes en el agua de escorrentía que el uso de un fertilizante de liberación controlada. En un estudio de un invernadero, los investigadores encontraron que no había diferencias significativas en la escorrentía total de fosfato y potasio entre los diferentes sistemas con vegetación, ni hubo ninguna diferencia entre los sistemas sin vegetación y los establecidos por brotes. La liberación de nitrato y nitrógeno total se redujo con las esteras de vegetación en comparación con las superficies establecidas por brotes y el sustrato sin vegetación.

Otros estudios informan que las concentraciones de fósforo en muestras tomadas 140 días después de la fertilización fueron ligeramente más altas que en las muestras tomadas 314 días después de la fertilización. Los autores hallaron diferencias en la liberación de fósforo entre diferentes sistemas con vegetación. La liberación de fósforo fue mayor en el sistema de semillas de sedum.

La fertilización de los techos verdes a menudo está motivada por lograr la cubierta vegetal requerida. Se ha investigado la supervivencia y el establecimiento de una serie de especies en un modelo de techo con vegetación extensiva con diferentes sustratos y rutinas de fertilización, y se ha encontrado que el crecimiento está directamente relacionado con el contenido de materia orgánica en el sustrato con plantas nativas no suculentas que requieren

sustratos más profundos, mayor contenido de materia orgánica o riego suplementario. Otros estudios han revelado que la ausencia de fertilizante afectó a ambos cultivos de piedra; las calificaciones visuales fueron más altas en los cultivos fertilizados en comparación con el control parcela que no recibió ningún fertilizante. Sin embargo, no hubo una tendencia común que vinculara el desarrollo del árbol de las especies nativas probadas (*symphyotrichum laeve*, *koeleria macrantha* y *solidago speciosa*) con la rutina de fertilización. La *koeleria macrantha* y la *showy goldenrod* se desempeñaron peor con los niveles más altos de fertilizante. Un número significativamente mayor de plantas sobrevivió cuando no fueron fertilizadas. La supervivencia de los árboles nativos dependía más de la disponibilidad de agua que de la fertilidad (Seidl, Mirande, Saad, & Gromaire, 2014).

Con respecto a la calidad del agua de escorrentía, según la evidencia mostrada, la mayor influencia en el contenido de nutrientes en la escorrentía proviene del material del suelo y los fertilizantes agregados. Si se necesita y cuánta fertilización puede ser reemplazada por riego en el período seco para el mismo buen resultado estético. Para algunas especies, la fertilización muestra incluso resultados negativos (Berndtsson, 2010).

4.9 Normativa colombiana

En Colombia por medio del decreto 1076 de 2015 del sector ambiente y desarrollo sostenible, se especifican los criterios a tener en cuenta para los sistemas de riego.

Criterios de calidad para uso agrícola: Los criterios de calidad admisibles del recurso para uso agrícola son los siguientes:

Tabla 6

Criterios de calidad para uso agrícola

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.1
Berilio	Be	0.1
Cadmio	Cd	0.01
Cinc	Zn	2.0
Cobalto	Co	0.05
Cobre	Cu	0.2
Cromo	Cr ⁺⁶	0.1
Flúor	F	1.0
Hierro	Fe	5.0
Litio	Li	2.5
Manganeso	Mn	0.2
Molibdeno	Mo	0.01
Níquel	Ni	0.2
pH	Unidades	4.5 – 9.0 unidades
Plomo	Pb	5.0
Selenio	Se	0.02
Vanadio	V	0.1

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

4.10 Análisis crítico

La gestión sostenible del agua es una acción global fundamental para aliviar la creciente presión sobre nuestros recursos hídricos y una forma de equilibrar las necesidades de agua tanto en el ámbito socioeconómicas como ambientales. El riego de techos verdes y otras infraestructuras verdes urbanas a menudo tiene una connotación negativa en el contexto de la gestión del agua. Este es el caso especialmente de las zonas áridas y semiáridas, donde tanto la escasez de agua durante el verano como otras necesidades de agua comprometen el apoyo público a los sistemas de riego urbano. Un reto interesante es asumir la creación de alternativas sostenibles en los tiempos de sequía, a modo de compensación por las bondades que los techos verdes como sistema de detención y tratamiento de aguas pluviales nos ofrece como el posterior

uso en riego con posibles y beneficiosos resultados a largo plazo, o por lo menos minimizar el impacto que nos produce en tiempos de sequía.

En cuanto al potencial de reciclaje de agua de salida de techos verdes, según las normas nacionales e internacionales, se indica que dicha agua puede ser utilizada para el riego de paisajes urbanos y para otros fines no potables, como la cisterna del inodoro. No obstante, el agua de salida del techo verde no se puede usar para consumo humano.

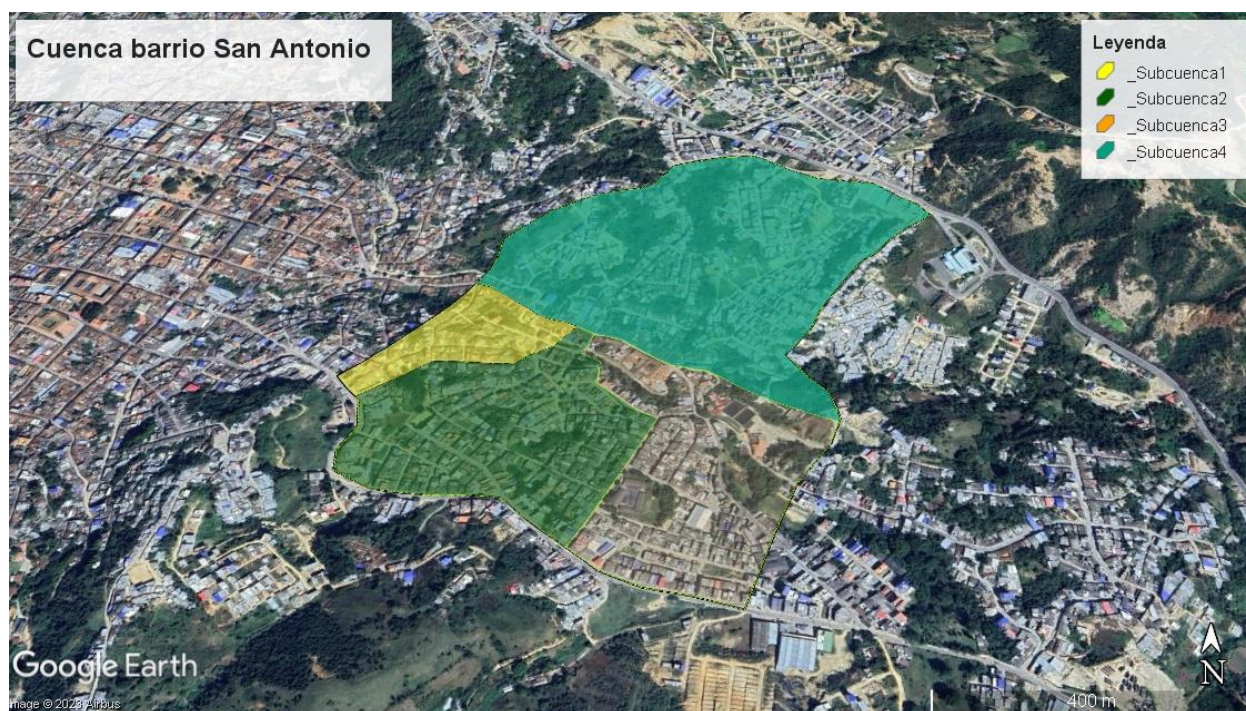
Capítulo 5. Modelación en el software Epa Swmn

5.1 Localización zona de estudio

El estudio se realizará en el municipio de Ocaña específicamente en la zona del barrio San Antonio y sus alrededores, la siguiente figura muestra la cuenca delimitada de aproximadamente 52,39 Ha, la cual se subdivide en 4 subcuencas.

Figura 13

Cuenca Barrio San Antonio



Nota. Tomado de (Google Earth, 2024)

5.2 Información general de la cuenca

Los siguientes parámetros son los utilizados para la elaboración del modelo en epa swmn.

5.2.1 Áreas de la subcuenca

Tabla 7

Distribución del área por subcuencas

N° Cuenca	Area (Ha)
1	3.99
2	11.9
3	11.3
4	25.2
Total	52.39

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.2.2 Clasificación de cuencas

De acuerdo a la siguiente información la cuenca se clasifica como una microcuenca:

Tabla 8

Clasificación cuencas

Rangos de Áreas (Km ²)	Clasificación
< 25	Microcuenca
25 - 250	Pequeña
250 - 500	Intermedia Pequeña
500 - 2500	Intermedia Grande
2500 - 5000	Grande
> 5000	Muy Grande

Nota. Tomado de (Campos Aranda, 1992)

5.2.3 Longitud del cauce

La longitud L de la cuenca viene definida por la longitud de su cauce principal, siendo la distancia equivalente que se recorre entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba (Ramón et al., n.d.).

Tabla 9*Longitud del cauce distribuido por subcuencas*

N° Cuenca	Longitud cauce (m)
1	536
2	656
3	712
4	875
Total	2779

5.2.4 Ancho de las subcuencas

El ancho de la subcuenca es el cociente entre el área de la subcuenca y la longitud mayor del cauce que esta presenta, si existen varias longitudes de cauce dentro de una misma subcuenca se tomara un promedio de estos.

Tabla 10*Ancho de las subcuencas*

Longitud (m)	Área (m ²)	Ancho (m)
453.2	39900	88.04
532.6	119000	223.43
606.25	113000	186.39
664.75	252000	379.09

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.2.5 Pendiente media del cauce

La pendiente media del cauce es el cociente entre la diferencia de las cotas (máxima y mínimas) y la longitud de esta.

Tabla 11*Pendiente media de las subcuencas*

N° Cuenca	Cota mayor (m)	Cota menor (m)	Longitud de cauce (m)	Pendiente del terreno (m/m)	Pendiente del terreno (%)	Clase
1	1214	1191	536	0.042910	4.2910	Suave
2	1223	1192	656	0.047256	4.7256	Suave
3	1223	1194	712	0.040730	4.0730	Suave
4	1243	1191	875	0.059429	5.9429	Suave

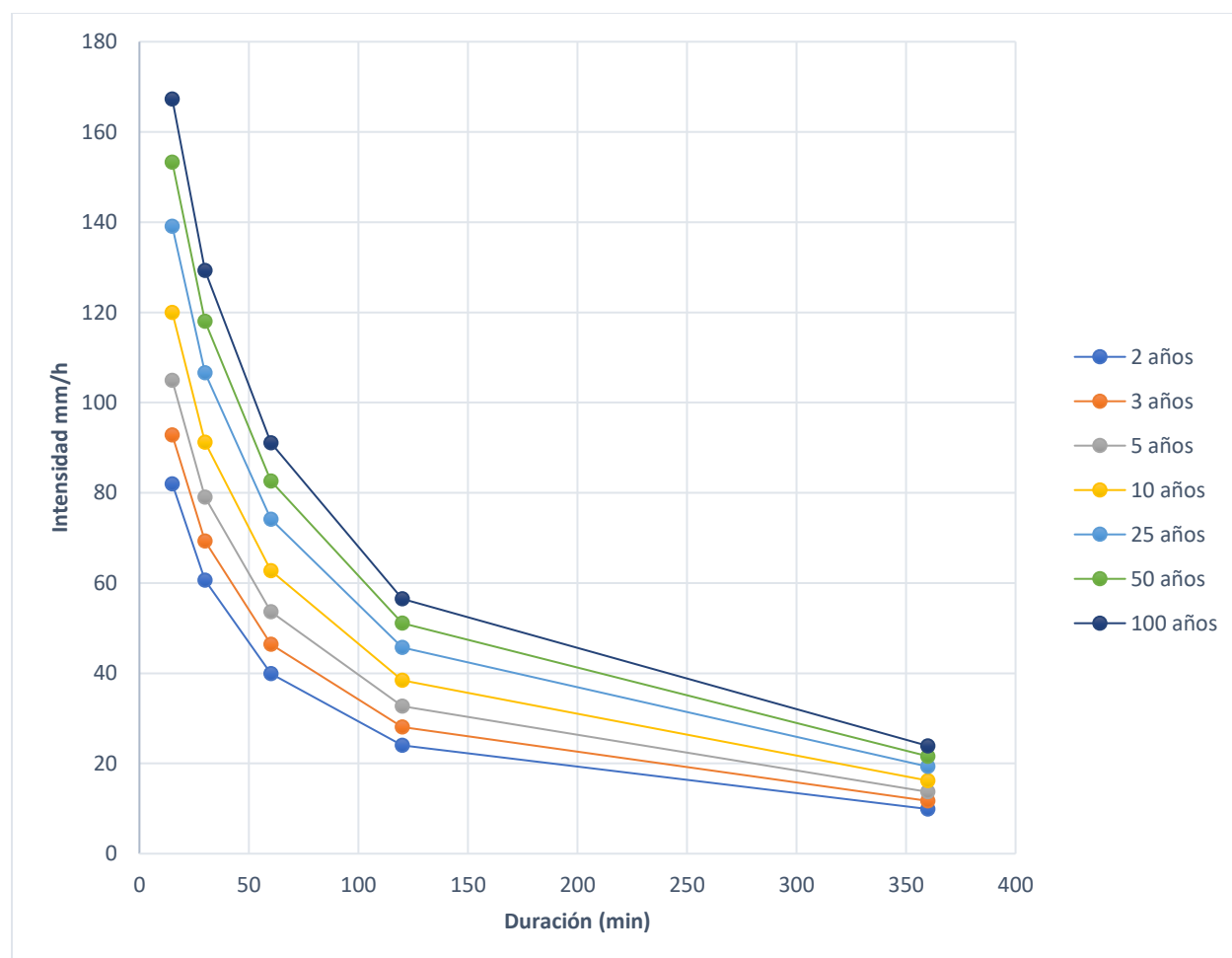
Nota. Tomado de (Autores, 2024)**Figura 14***Curva IDF**Nota.* Tomado de (Autores, 2024)

Tabla 12*Intensidad*

D (min)	Intensidad mm/h						
	2 años	3 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
15	82	92.8	104.9	120	139.1	153.3	167.3
30	60.6	69.3	79	91.2	106.6	118	129.3
60	39.9	46.4	53.6	62.7	74.1	82.6	91.1
120	24	28.1	32.7	38.4	45.7	51.1	56.5
360	9.9	11.7	13.7	16.2	19.3	21.6	23.9

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Tabla 13*TR (años)*

TR (años)	C1	X0	C2
2	2393.698	23.248	0.926
3	2766.321	24.899	0.921
5	3218.148	26.547	0.919
10	3827.385	28.354	0.919
25	4647.123	30.28	0.92
50	5283.186	31.498	0.922
100	5933.377	32.561	0.924

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.2.6 Hietogramas de la cuenca con el método de bloques alternos

El método de bloques alternos es un método para calcular hietogramas de la curva de Intensidad Duración Frecuencia (IDF), para una duración de un evento determinado y un periodo de retorno específico (Chin, 2014).

Utilizando la información de la curva IDF se realizarán los hietogramas para los periodos de retorno de 2,5,10,25,50 y 100 años.

1. Se seleccionan los periodos de retorno y la duración del evento (El método de bloques alternos establece que se realice cada 5 min.).
2. Se toma la información de las intensidades obtenidas de la curva IDF.
3. Se calcula la precipitación.
4. Se reorganiza la información, donde la mayor intensidad se ubica en el centro y luego en forma secuencial se colocan las siguientes informaciones hacia la derecha y a la izquierda en forma escalonada.

En las siguientes tablas se muestran los cálculos de los hietogramas para los diferentes periodos de retorno, información que más adelante será ingresada en los rain gage.

Tabla 14

Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 2 años, por el método de bloques alternos

ID Dato	Tiempo (min)	I (mm/hr)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación Incremental (mm)	Intensidad Parcial (mm/h)	Precipitación (mm)	Curva de Masa (mm)
1	5	108.5	9.0	9.0	35	0.28	0.28
2	10	93.3	15.6	6.5	33	0.30	0.58
3	15	82.0	20.5	4.9	31	0.33	0.90
4	20	73.1	24.4	3.9	29	0.36	1.26
5	25	66.1	27.5	3.2	27	0.39	1.66
6	30	60.3	30.2	2.6	25	0.44	2.10
7	35	55.5	32.4	2.2	23	0.49	2.59
8	40	51.4	34.3	1.9	21	0.56	3.14
9	45	47.9	36.0	1.7	19	0.64	3.78
10	50	44.9	37.4	1.5	17	0.74	4.52
11	55	42.2	38.7	1.3	15	0.87	5.39
12	60	39.9	39.9	1.2	13	1.05	6.45
13	65	37.8	40.9	1.1	11	1.30	7.75
14	70	35.9	41.9	1.0	9	1.66	9.41
15	75	34.2	42.8	0.9	7	2.22	11.63
16	80	32.7	43.6	0.8	5	3.16	14.79

17	85	31.3	44.3	0.7	3	4.94	19.73
18	90	30.0	45.0	0.7	1	9.04	28.77
19	95	28.8	45.6	0.6	2	6.51	35.28
20	100	27.7	46.2	0.6	4	3.89	39.17
21	105	26.7	46.8	0.6	6	2.62	41.79
22	110	25.8	47.3	0.5	8	1.91	43.70
23	115	24.9	47.8	0.5	10	1.46	45.16
24	120	24.1	48.3	0.5	12	1.17	46.33
25	125	23.4	48.7	0.4	14	0.96	47.29
26	130	22.7	49.1	0.4	16	0.80	48.09
27	135	22.0	49.5	0.4	18	0.69	48.77
28	140	21.4	49.9	0.4	20	0.59	49.37
29	145	20.8	50.2	0.4	22	0.52	49.89
30	150	20.2	50.6	0.3	24	0.46	50.35
31	155	19.7	50.9	0.3	26	0.42	50.77
32	160	19.2	51.2	0.3	28	0.38	51.15
33	165	18.7	51.5	0.3	30	0.34	51.49
34	170	18.3	51.8	0.3	32	0.31	51.80
35	175	17.9	52.1	0.3	34	0.29	52.09
36	180	17.5	52.4	0.3	36	0.27	52.36

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Tabla 15

Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 5 años, por el método de bloques alternos.

ID Dato	Tiempo (min)	I (mm/hr)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación Incremental (mm)	Intensidad Parcial (mm/h)	Precipitación (mm)	Curva de Masa (mm)
1	5	134.9	11.2	11.2	35	0.42	0.42
2	10	117.9	19.6	8.4	33	0.46	0.88
3	15	104.8	26.2	6.5	31	0.50	1.37
4	20	94.4	31.5	5.3	29	0.54	1.91
5	25	85.9	35.8	4.3	27	0.60	2.51
6	30	78.9	39.5	3.7	25	0.66	3.17
7	35	73.0	42.6	3.1	23	0.74	3.91
8	40	67.9	45.3	2.7	21	0.83	4.74
9	45	63.6	47.7	2.4	19	0.95	5.69
10	50	59.7	49.8	2.1	17	1.10	6.79
11	55	56.4	51.7	1.9	15	1.29	8.07

12	60	53.4	53.4	1.7	13	1.54	9.61
13	65	50.7	54.9	1.5	11	1.88	11.50
14	70	48.3	56.3	1.4	9	2.38	13.88
15	75	46.1	57.6	1.3	7	3.13	17.00
16	80	44.1	58.8	1.2	5	4.34	21.35
17	85	42.3	59.9	1.1	3	6.55	27.89
18	90	40.6	60.9	1.0	1	11.24	39.14
19	95	39.1	61.8	0.9	2	8.40	47.54
20	100	37.6	62.7	0.9	4	5.27	52.80
21	105	36.3	63.6	0.8	6	3.66	56.46
22	110	35.1	64.3	0.8	8	2.71	59.17
23	115	34.0	65.1	0.7	10	2.11	61.28
24	120	32.9	65.8	0.7	12	1.70	62.98
25	125	31.9	66.4	0.7	14	1.40	64.38
26	130	31.0	67.1	0.6	16	1.19	65.57
27	135	30.1	67.7	0.6	18	1.02	66.58
28	140	29.2	68.2	0.6	20	0.89	67.47
29	145	28.5	68.8	0.5	22	0.78	68.25
30	150	27.7	69.3	0.5	24	0.70	68.95
31	155	27.0	69.8	0.5	26	0.63	69.58
32	160	26.3	70.3	0.5	28	0.57	70.15
33	165	25.7	70.7	0.5	30	0.52	70.66
34	170	25.1	71.2	0.4	32	0.47	71.14
35	175	24.5	71.6	0.4	34	0.44	71.58
36	180	24.0	72.0	0.4	36	0.41	71.98

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Tabla 16

Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 10 años, por el método de bloques alternos.

ID Dato	Tiempo (min)	I (mm/hr)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación Incremental (mm)	Intensidad Parcial (mm/h)	Precipitación (mm)	Curva de Masa (mm)
1	5	152.5	12.70	12.70	35	0.51	0.51
2	10	134.1	22.35	9.64	33	0.56	1.07
3	15	119.8	29.95	7.60	31	0.60	1.68
4	20	108.4	36.12	6.17	29	0.66	2.34

5	25	99.0	41.25	5.13	27	0.73	3.06
6	30	91.2	45.59	4.34	25	0.81	3.87
7	35	84.5	49.32	3.73	23	0.90	4.77
8	40	78.8	52.56	3.24	21	1.01	5.78
9	45	73.9	55.42	2.86	19	1.15	6.94
10	50	69.5	57.95	2.54	17	1.33	8.27
11	55	65.7	60.23	2.27	15	1.56	9.83
12	60	62.3	62.28	2.05	13	1.86	11.69
13	65	59.2	64.14	1.86	11	2.27	13.96
14	70	56.4	65.84	1.70	9	2.86	16.82
15	75	53.9	67.40	1.56	7	3.73	20.55
16	80	51.6	68.84	1.44	5	5.13	25.67
17	85	49.5	70.17	1.33	3	7.60	33.28
18	90	47.6	71.41	1.24	1	12.70	45.98
19	95	45.8	72.56	1.15	2	9.64	55.62
20	100	44.2	73.64	1.08	4	6.17	61.80
21	105	42.7	74.66	1.01	6	4.34	66.14
22	110	41.2	75.61	0.95	8	3.24	69.38
23	115	39.9	76.51	0.90	10	2.54	71.92
24	120	38.7	77.36	0.85	12	2.05	73.97
25	125	37.5	78.16	0.81	14	1.70	75.67
26	130	36.4	78.93	0.76	16	1.44	77.11
27	135	35.4	79.66	0.73	18	1.24	78.34
28	140	34.4	80.35	0.69	20	1.08	79.42
29	145	33.5	81.01	0.66	22	0.95	80.38
30	150	32.7	81.64	0.63	24	0.85	81.23
31	155	31.8	82.25	0.60	26	0.76	81.99
32	160	31.1	82.83	0.58	28	0.69	82.69
33	165	30.3	83.38	0.56	30	0.63	83.32
34	170	29.6	83.92	0.53	32	0.58	83.90
35	175	28.9	84.43	0.51	34	0.53	84.43
36	180	28.3	84.93	0.50	36	0.50	84.93

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Tabla 17

Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 25 años, por el método de bloques alternos.

ID Dato	Tiempo (min)	I (mm/hr)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación Incremental (mm)	Intensidad Parcial (mm/h)	Precipitación (mm)	Curva de Masa (mm)
1	5	175.2	14.60	14.60	35	0.64	0.64
2	10	155.1	25.84	11.25	33	0.69	1.32
3	15	139.2	34.81	8.97	31	0.75	2.07
4	20	126.4	42.15	7.34	29	0.82	2.89
5	25	115.9	48.28	6.14	27	0.90	3.78
6	30	107.0	53.51	5.22	25	0.99	4.78
7	35	99.4	58.01	4.50	23	1.11	5.89
8	40	92.9	61.95	3.94	21	1.25	7.14
9	45	87.2	65.42	3.47	19	1.42	8.56
10	50	82.2	68.51	3.09	17	1.64	10.20
11	55	77.8	71.29	2.78	15	1.92	12.12
12	60	73.8	73.80	2.51	13	2.28	14.40
13	65	70.2	76.08	2.28	11	2.78	17.18
14	70	67.0	78.17	2.09	9	3.47	20.65
15	75	64.1	80.08	1.92	7	4.50	25.15
16	80	61.4	81.85	1.77	5	6.14	31.29
17	85	58.9	83.49	1.64	3	8.97	40.26
18	90	56.7	85.02	1.52	1	14.60	54.85
19	95	54.6	86.44	1.42	2	11.25	66.10
20	100	52.7	87.77	1.33	4	7.34	73.44
21	105	50.9	89.02	1.25	6	5.22	78.66
22	110	49.2	90.20	1.18	8	3.94	82.59
23	115	47.6	91.31	1.11	10	3.09	85.69
24	120	46.2	92.36	1.05	12	2.51	88.20
25	125	44.8	93.35	0.99	14	2.09	90.28
26	130	43.5	94.29	0.94	16	1.77	92.05
27	135	42.3	95.19	0.90	18	1.52	93.58
28	140	41.2	96.05	0.86	20	1.33	94.91
29	145	40.1	96.87	0.82	22	1.18	96.08
30	150	39.1	97.65	0.78	24	1.05	97.13
31	155	38.1	98.39	0.75	26	0.94	98.08
32	160	37.2	99.11	0.72	28	0.86	98.93
33	165	36.3	99.80	0.69	30	0.78	99.71

34	170	35.5	100.46	0.66	32	0.72	100.43
35	175	34.7	101.09	0.64	34	0.66	101.09
36	180	33.9	101.70	0.61	36	0.61	101.70

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Tabla 18

Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 50 años, por el método de bloques alternos.

ID Dato	Tiempo (min)	I (mm/hr)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación Incremental (mm)	Intensidad Parcial (mm/h)	Precipitación (mm)	Curva de Masa (mm)
1	5	191.6	15.97	15.97	35	0.72	0.72
2	10	170.2	28.37	12.40	33	0.78	1.50
3	15	153.3	38.32	9.95	31	0.85	2.35
4	20	139.5	46.51	8.18	29	0.93	3.27
5	25	128.1	53.37	6.87	27	1.02	4.29
6	30	118.5	59.23	5.86	25	1.13	5.42
7	35	110.2	64.30	5.07	23	1.26	6.68
8	40	103.1	68.73	4.43	21	1.42	8.10
9	45	96.9	72.65	3.92	19	1.61	9.72
10	50	91.4	76.14	3.49	17	1.86	11.58
11	55	86.5	79.28	3.14	15	2.17	13.75
12	60	82.1	82.12	2.84	13	2.58	16.34
13	65	78.2	84.71	2.58	11	3.14	19.48
14	70	74.6	87.07	2.36	9	3.92	23.40
15	75	71.4	89.25	2.17	7	5.07	28.46
16	80	68.4	91.25	2.01	5	6.87	35.33
17	85	65.7	93.11	1.86	3	9.95	45.28
18	90	63.2	94.84	1.73	1	15.97	61.25
19	95	60.9	96.46	1.61	2	12.40	73.65
20	100	58.8	97.97	1.51	4	8.18	81.83
21	105	56.8	99.39	1.42	6	5.86	87.69
22	110	54.9	100.73	1.34	8	4.43	92.13
23	115	53.2	101.99	1.26	10	3.49	95.62
24	120	51.6	103.18	1.19	12	2.84	98.46
25	125	50.1	104.31	1.13	14	2.36	100.83
26	130	48.6	105.38	1.07	16	2.01	102.83
27	135	47.3	106.40	1.02	18	1.73	104.56

28	140	46.0	107.37	0.97	20	1.51	106.07
29	145	44.8	108.30	0.93	22	1.34	107.41
30	150	43.7	109.18	0.89	24	1.19	108.60
31	155	42.6	110.03	0.85	26	1.07	109.67
32	160	41.6	110.84	0.81	28	0.97	110.64
33	165	40.6	111.62	0.78	30	0.89	111.53
34	170	39.7	112.37	0.75	32	0.81	112.34
35	175	38.8	113.09	0.72	34	0.75	113.09
36	180	37.9	113.78	0.69	36	0.69	113.78

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Tabla 19

Cálculo de hietograma para un periodo de retorno de 100 años, por el método de bloques alternos.

ID Dato	Tiempo (min)	I (mm/hr)	Precipitación Acumulada (mm)	Precipitación Incremental (mm)	Intensidad Parcial (mm/h)	Precipitación (mm)	Curva de Masa (mm)
1	5	208.1	17.34	17.34	35	0.80	0.80
2	10	185.4	30.90	13.56	33	0.87	1.68
3	15	167.3	41.83	10.93	31	0.95	2.62
4	20	152.5	50.85	9.02	29	1.04	3.66
5	25	140.3	58.44	7.59	27	1.14	4.80
6	30	129.9	64.94	6.49	25	1.26	6.07
7	35	121.0	70.56	5.63	23	1.41	7.48
8	40	113.2	75.50	4.93	21	1.59	9.06
9	45	106.5	79.86	4.37	19	1.81	10.87
10	50	100.5	83.76	3.90	17	2.08	12.95
11	55	95.2	87.26	3.50	15	2.43	15.38
12	60	90.4	90.43	3.17	13	2.89	18.27
13	65	86.1	93.32	2.89	11	3.50	21.77
14	70	82.3	95.96	2.64	9	4.37	26.14
15	75	78.7	98.39	2.43	7	5.63	31.77
16	80	75.5	100.64	2.24	5	7.59	39.36
17	85	72.5	102.72	2.08	3	10.93	50.29
18	90	69.8	104.65	1.94	1	17.34	67.63
19	95	67.2	106.46	1.81	2	13.56	81.19
20	100	64.9	108.15	1.69	4	9.02	90.21

21	105	62.7	109.74	1.59	6	6.49	96.70
22	110	60.7	111.24	1.49	8	4.93	101.63
23	115	58.8	112.65	1.41	10	3.90	105.53
24	120	57.0	113.98	1.33	12	3.17	108.70
25	125	55.3	115.24	1.26	14	2.64	111.34
26	130	53.7	116.44	1.20	16	2.24	113.59
27	135	52.3	117.58	1.14	18	1.94	115.53
28	140	50.9	118.67	1.09	20	1.69	117.22
29	145	49.5	119.71	1.04	22	1.49	118.71
30	150	48.3	120.70	0.99	24	1.33	120.05
31	155	47.1	121.65	0.95	26	1.20	121.25
32	160	46.0	122.55	0.91	28	1.09	122.33
33	165	44.9	123.43	0.87	30	0.99	123.32
34	170	43.9	124.26	0.84	32	0.91	124.23
35	175	42.9	125.07	0.80	34	0.84	125.07
36	180	41.9	125.84	0.77	36	0.77	125.84

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.3 Información ingresada a Epa Swmn

5.3.1 Rain gages

Se ingresa la información de los hietogramas para los diferentes periodos de retorno.

Figura 15

Ventana Rain Gage

Property	Value
Name	R1
X-Coordinate	683236.945
Y-Coordinate	910701.455
Description	
Tag	
Rain Format	VOLUME
Time Interval	0:05
Snow Catch Factor	1.0
Data Source	TIMESERIES
TIME SERIES:	
- Series Name	2AÑOS
DATA FILE:	
- File Name	
- Station ID	*
- Rain Units	MM

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.3.2 Subcatchments

Se ingresa el área, ancho, pendiente y porcentaje de área impermeable de la subcuenca, además del n de Manning, los controles LID (techos verdes) y el rain gage que se desee utilizar.

Figura 16

Ventana Subcatchments.

Subcatchment S1	
Property	Value
Name	S1
X-Coordinate	682103.473
Y-Coordinate	910353.686
Description	
Tag	
Rain Gage	R6
Outlet	O2
Area	3.99
Width	88.04
% Slope	4.29
% Imperv	93.58
N-Imperv	0.015
N-Perv	0.035
Dstore-Imperv	0.05
Dstore-Perv	0.05
%Zero-Imperv	25
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	1
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
N-Perv Pattern	
Dstore Pattern	
Infil. Pattern	

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.3.3 Nodos (Juntion y Outfall)

Se agregan las coordenadas y cotas de estos puntos además de la serie de tiempo que se planea evaluar.

Figura 17

Ventana Juntion

Junction Nodo1 	
Property	Value
Name	Nodo1
X-Coordinate	681920.167
Y-Coordinate	910310.815
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	1191
Max. Depth	0
Initial Depth	0
Surcharge Depth	0
Ponded Area	0

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 18

Ventana Outfall.

Outfall O1 	
Property	Value
Name	O1
X-Coordinate	682206.996
Y-Coordinate	910410.113
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	1191
Tide Gate	NO
Route To	
Type	FREE
Fixed Outfall	
Fixed Stage	0
Tidal Outfall	
Curve Name	*
Time Series Outfall	
Series Name	100AÑOS

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.3.4 Conduit

Se ingresa la información del tipo de conducto que se desee utilizar.

Figura 19

Ventana Conduit.

Conduit L1

Property	Value
Name	L1
Inlet Node	Nodo1
Outlet Node	O2
Description	
Tag	
Shape	RECT_OPEN
Max. Depth	1
Length	536
Roughness	0.015
Inlet Offset	1214
Outlet Offset	1191
Initial Flow	0
Maximum Flow	0
Entry Loss Coeff.	0
Exit Loss Coeff.	0
Avg. Loss Coeff.	0
Seepage Loss Rate	0
Flap Gate	NO
Culvert Code	
Inlets	NO

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 20

Ventana Cross – section editor.

Cross-Section Editor

Rectangular

Trapezoidal

Triangular

Parabolic

Open rectangular channel. Sidewalls can be removed for 2-D modeling.

Number of Barrels

Maximum Height

Bottom Width

Sidewalls Removed

1

1

6

None

Dimensions are meters unless otherwise stated.

OK

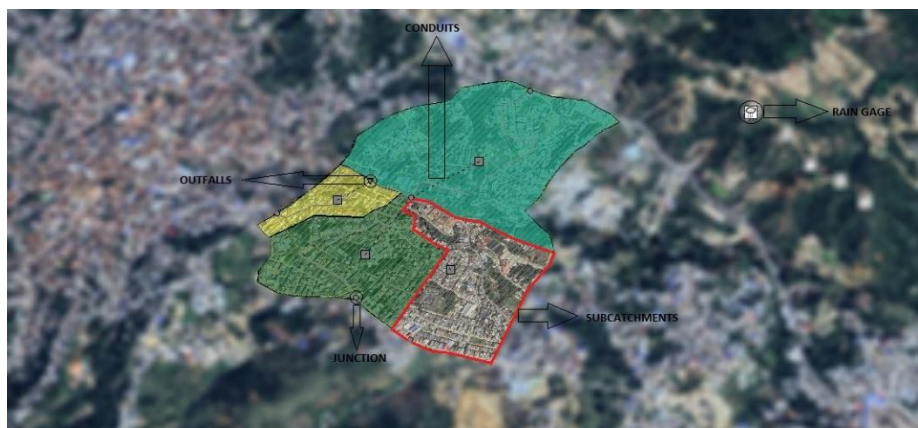
Cancel

Help

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 21

Modelo Epa Swmn.

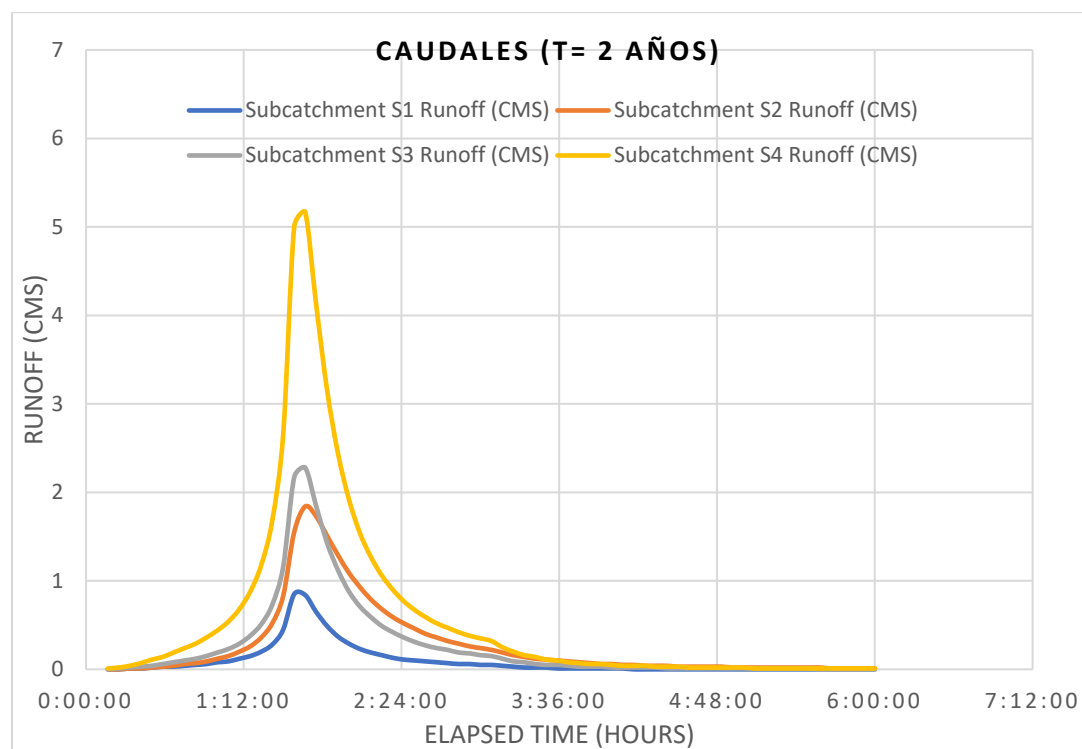


Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.3.5 Hidrogramas de las subcuencas para cada periodo de retorno sin utilizar SUDS.

Figura 22

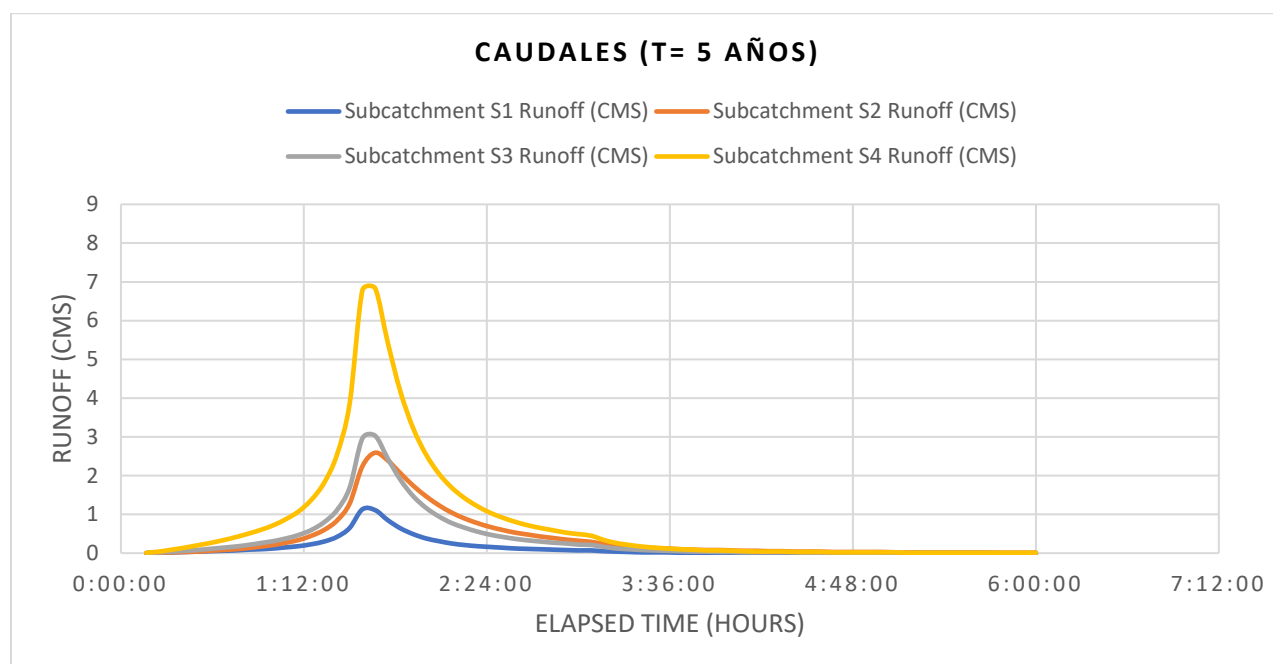
Caudales de las subcuencas con un $T = 2$ años (sin aplicar SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 23

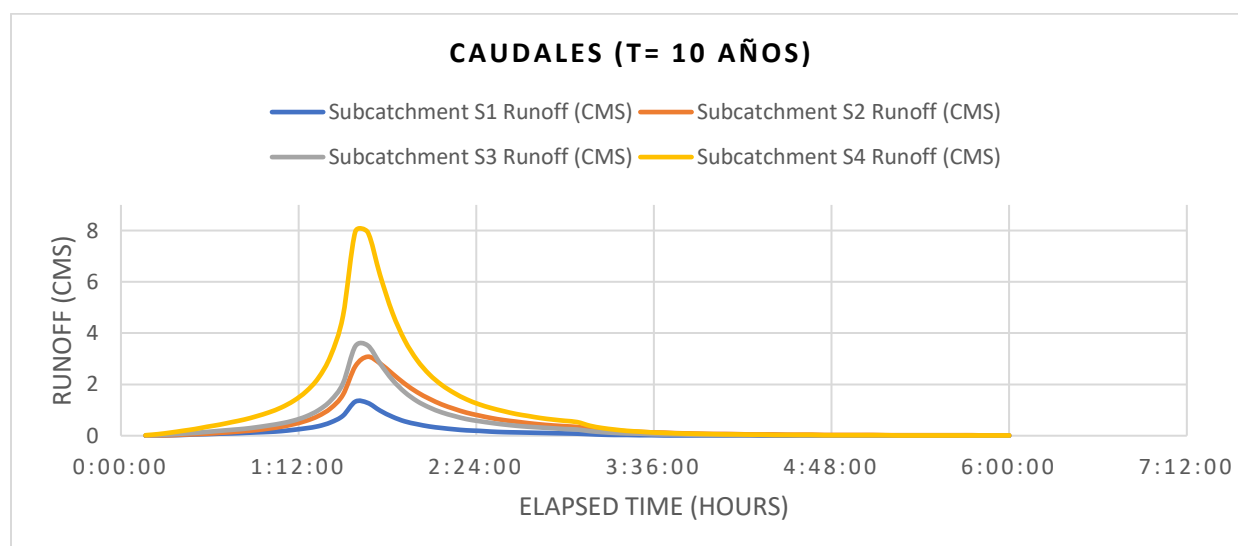
Caudales de las subcuencas con un $T = 5$ años (sin aplicar SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 24

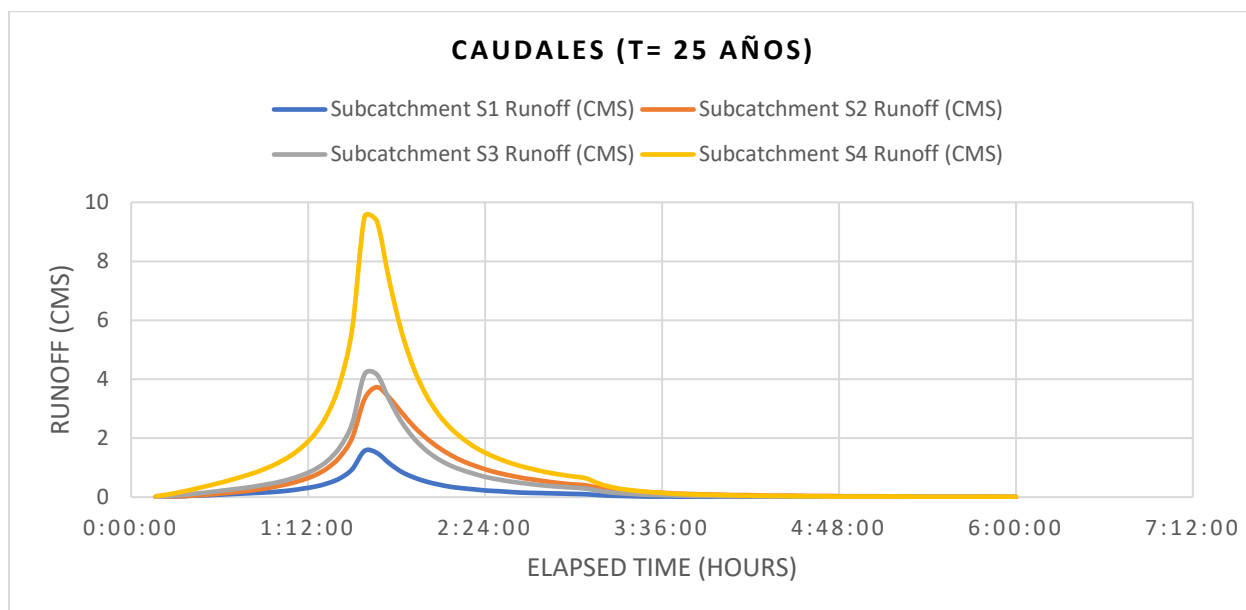
Caudales de las subcuencas con un $T = 10$ años (sin aplicar SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 25

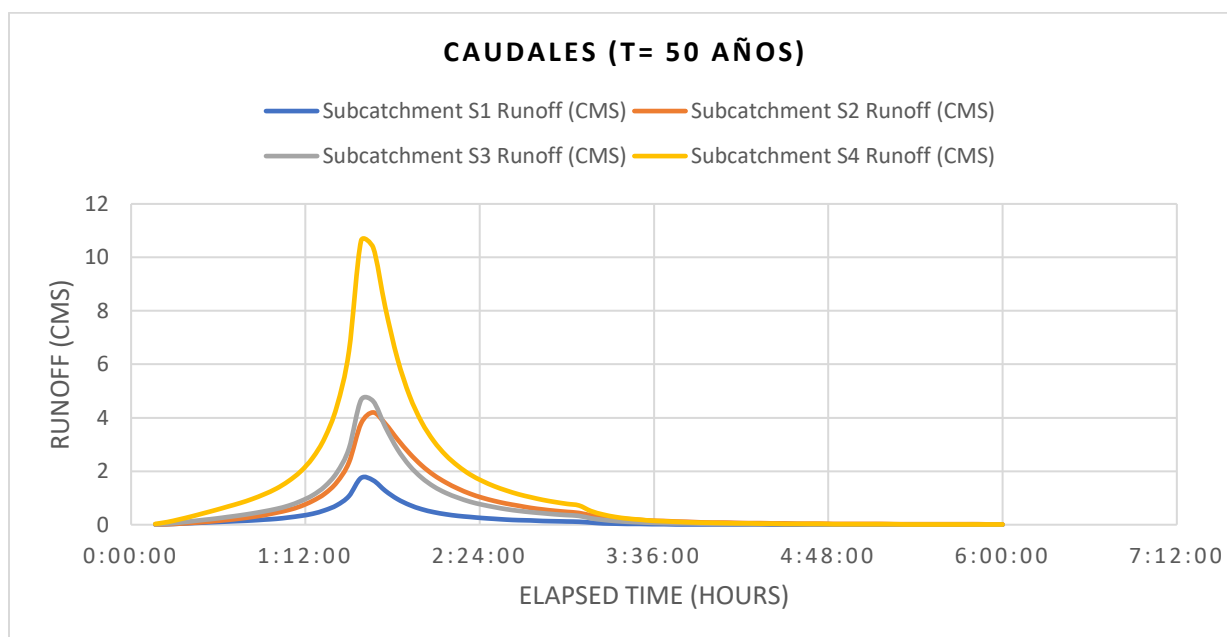
Caudales de las subcuencas con un $T = 25$ años (sin aplicar SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 26

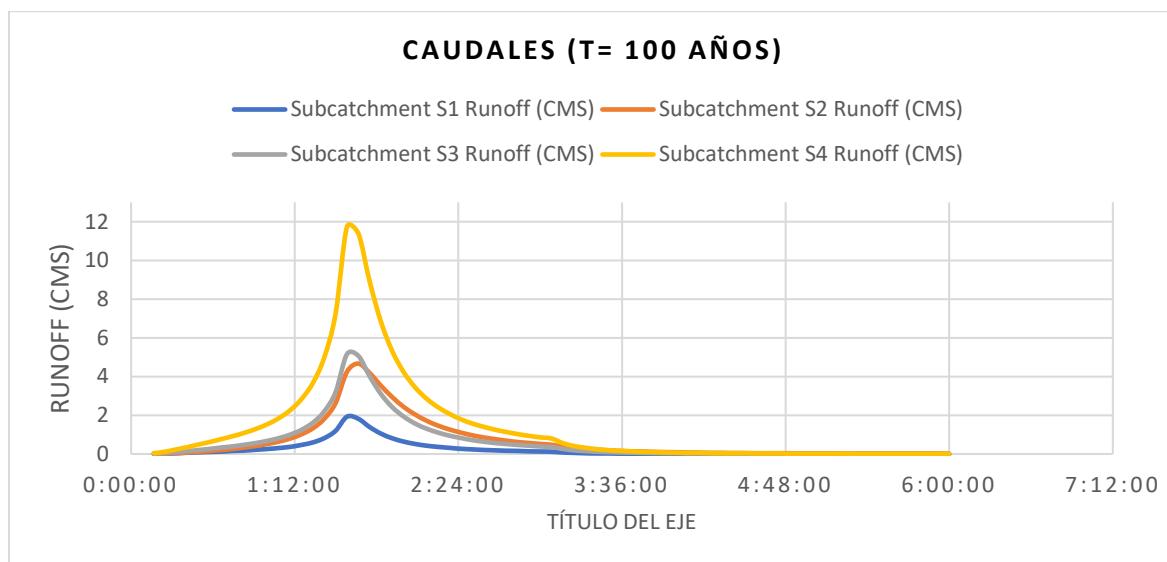
Caudales de las subcuencas con un $T = 50$ años (sin aplicar SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 27

Caudales de las subcuencas con un $T = 100$ años (sin aplicar SUDS)

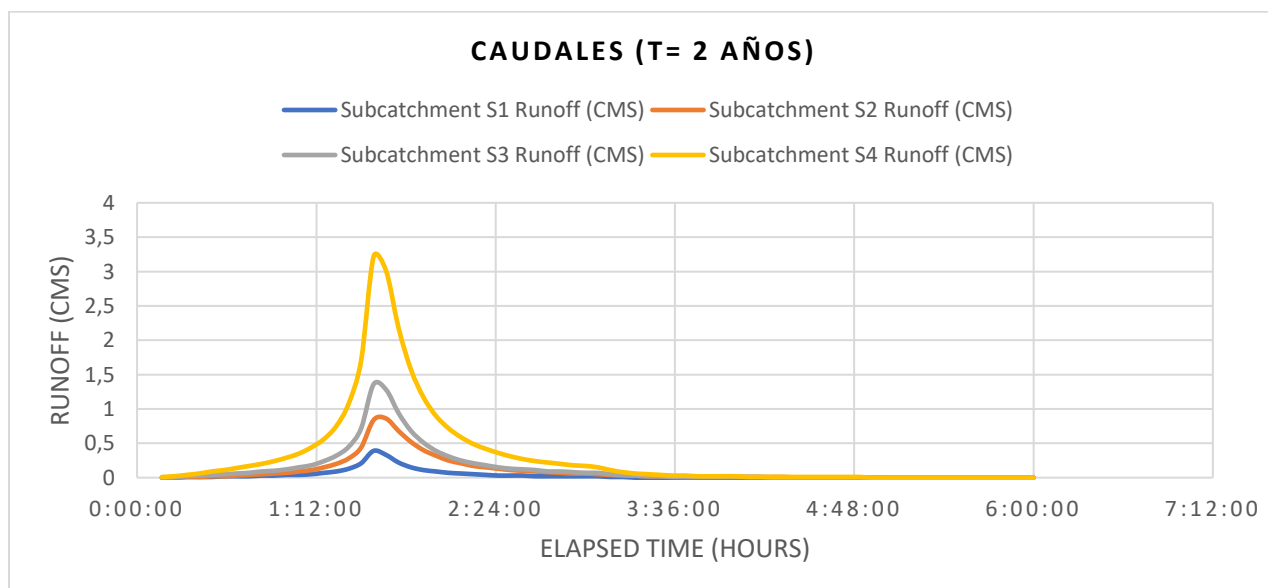


Nota. Tomado de (Autores, 2024)

5.3.6 Hidrogramas de las subcuencas para cada periodo de retorno utilizando SUDS.

Figura 28

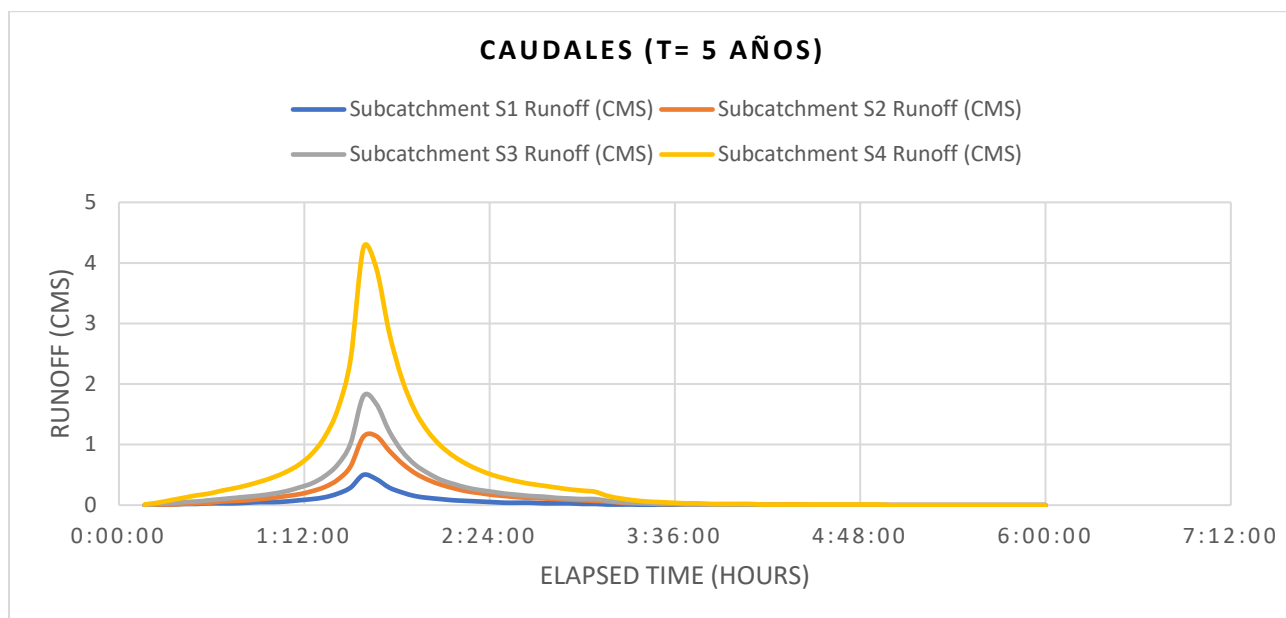
Caudales de las subcuencas con un $T = 2$ años (aplicando SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 29

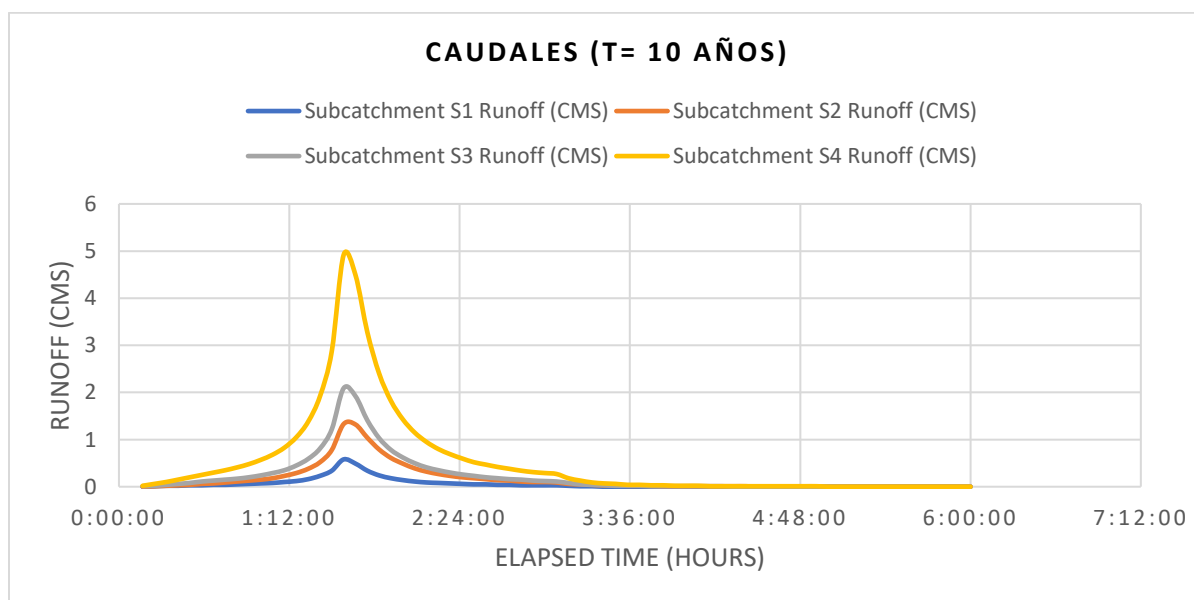
Caudales de las subcuencas con un $T = 5$ años (aplicando SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 30

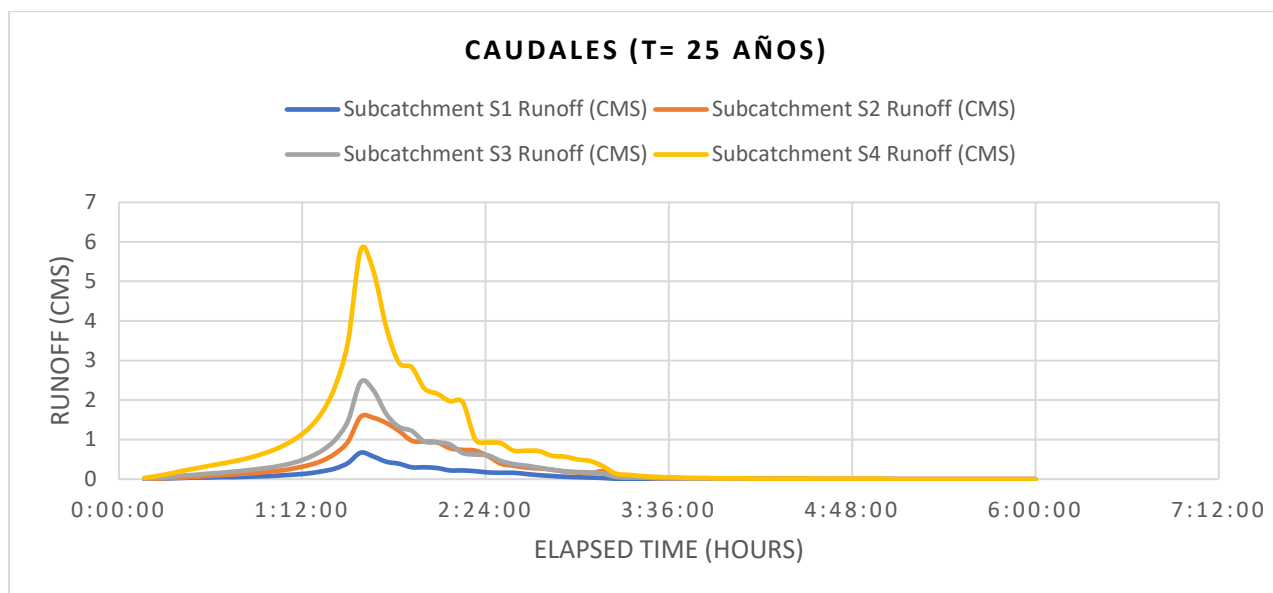
Caudales de las subcuencas con un $T = 10$ años (aplicando SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 31

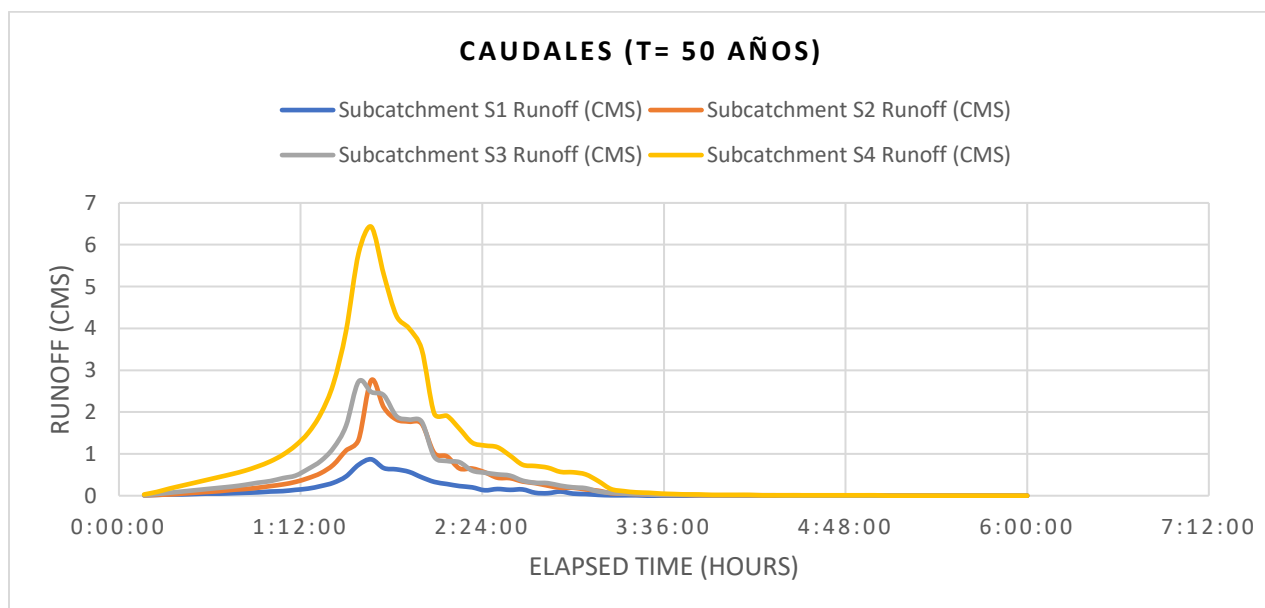
Caudales de las subcuencas con un $T = 25$ años (aplicando SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 32

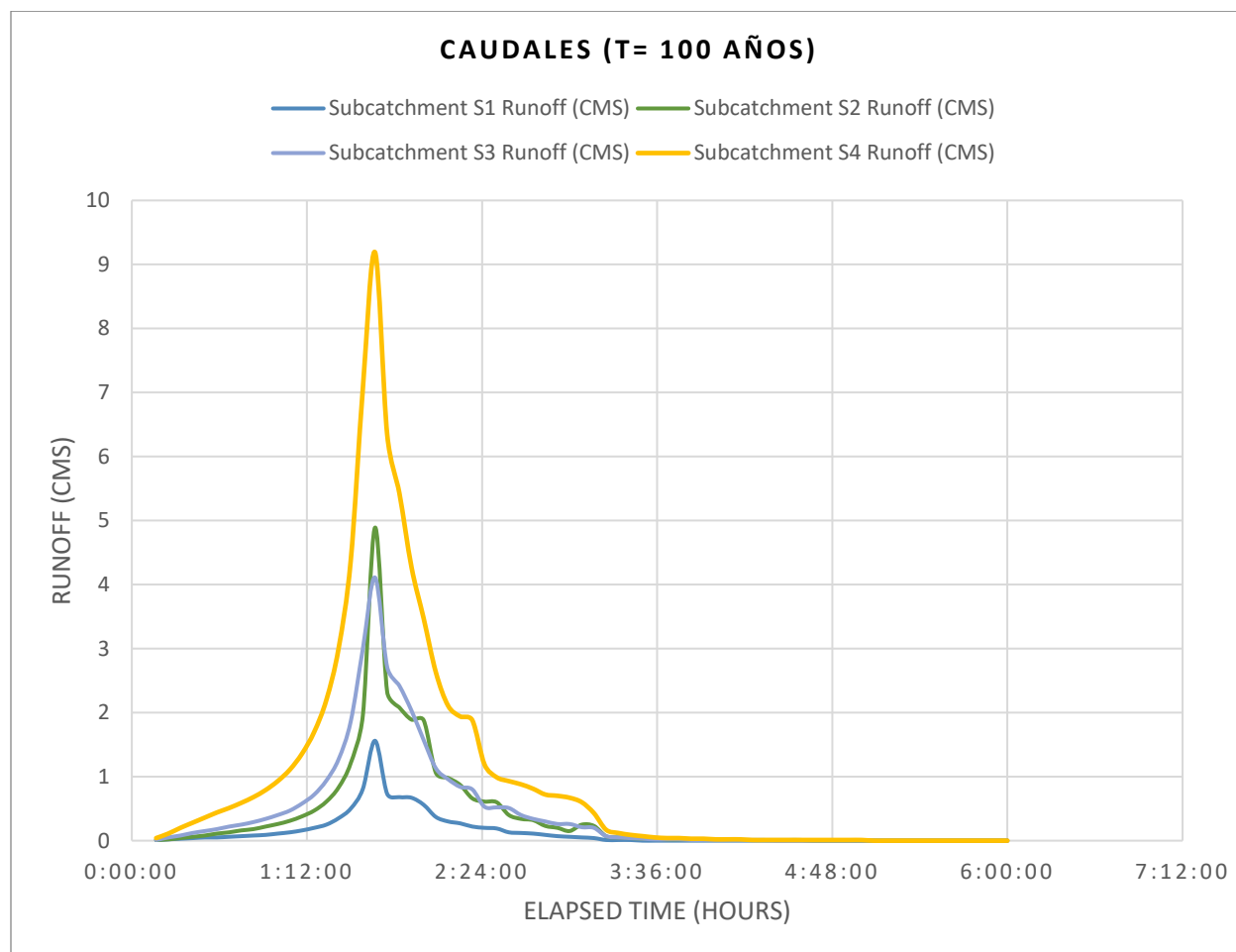
Caudales de las subcuencas con un $T = 50$ años (aplicando SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 33

Caudales de las subcuencas con un $T = 100$ años (aplicando SUDS)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Capítulo 6. Síntesis crítica

Luego de realizar el modelado en el software Epa Swmn los resultados son positivos, ya que se puede apreciar claramente el impacto que tienen los techos verdes frente a los eventos de lluvia.

Se realizó el recorrido de la cuenca por medio de Google Earth, se delimitaron las áreas residenciales y comerciales de cada subcuenca donde se podría utilizar los techos verdes, A continuación, se muestran las áreas de cada subcuenca:

Figura 34

Áreas de las subcuencas

Subcuenca	1	2	3	4
Zona	Área (ha)			
Residencial	2,18	6,22	3,93	9,79
Comercial	0,31	1,5	1,47	1,6
Verde	0,78	1,69	2,75	10,21
Pavimento	0,72	2,49	2,51	3,59
Institucional	0	0	0,64	0

Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Se tomó un área promedio de 50 m² tanto para las áreas residenciales y comerciales de cada subcuenca dando como resultado la siguiente información:

Figura 35*Resultados*

SUBCUENCA	ALTERNATIVA	UND	CANTIDAD	OBSERVACIÓN
1	Techos Verdes	und	498	Se tomaron las áreas residenciales y comerciales de cada subcuenca y se dividieron entre un área promedio de vivienda de 50 m ² .
2	Techos Verdes	und	1545	Se tomaron las áreas residenciales y comerciales de cada subcuenca y se dividieron entre un área promedio de vivienda de 50 m ² .
3	Techos Verdes	und	1081	Se tomaron las áreas residenciales y comerciales de cada subcuenca y se dividieron entre un área promedio de vivienda de 50 m ² .
4	Techos Verdes	und	2279	Se tomaron las áreas residenciales y comerciales de cada subcuenca y se dividieron entre un área promedio de vivienda de 50 m ² .

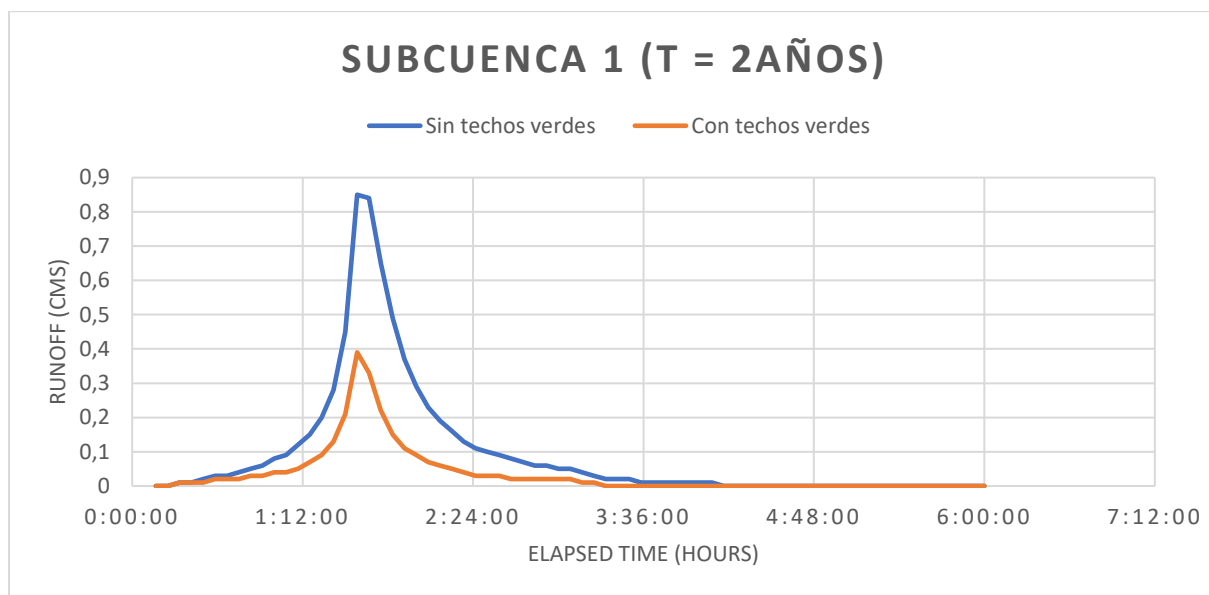
Nota. Tomado de (Autores, 2024)

La subcuenca 1 (62,4%) y subcuenca 2 (64,9%), son las que mayor área cubren los techos verdes de acuerdo a la cantidad de unidades utilizadas, mientras que en la subcuenca 3 y la subcuenca 4 las áreas residenciales y comerciales abarcan el 47,8% y 45,2% respectivamente.

Las siguientes gráficas muestran la disminución del caudal de salida de la subcuenca 1 para los diferentes periodos de retorno.

Figura 36

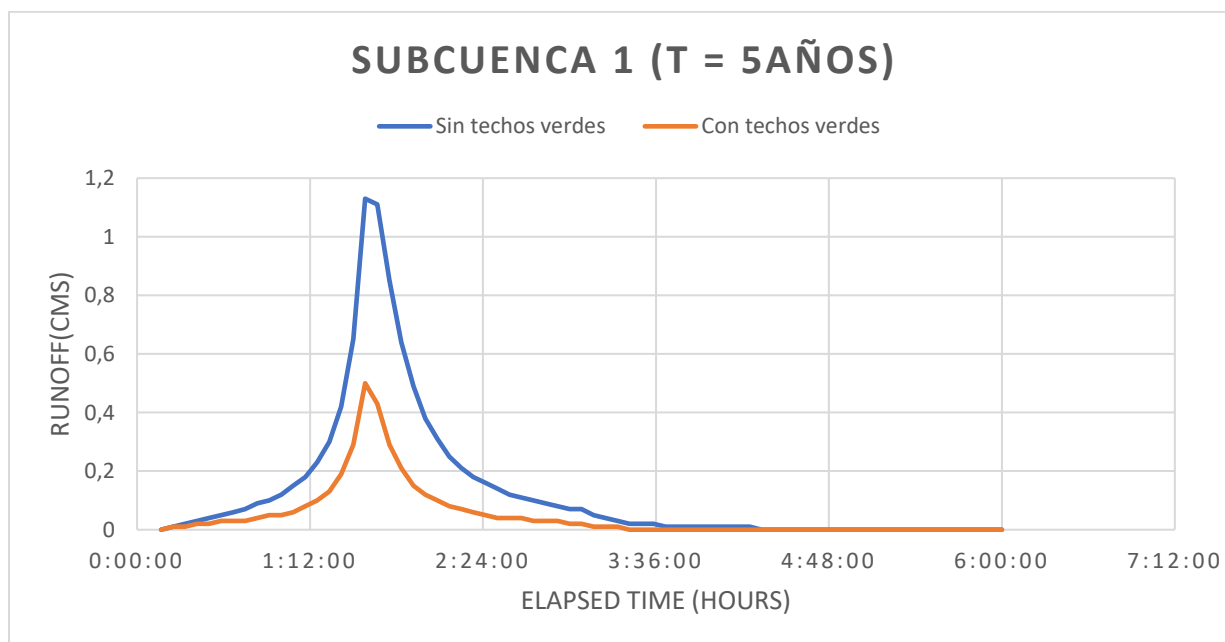
Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=2años)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 37

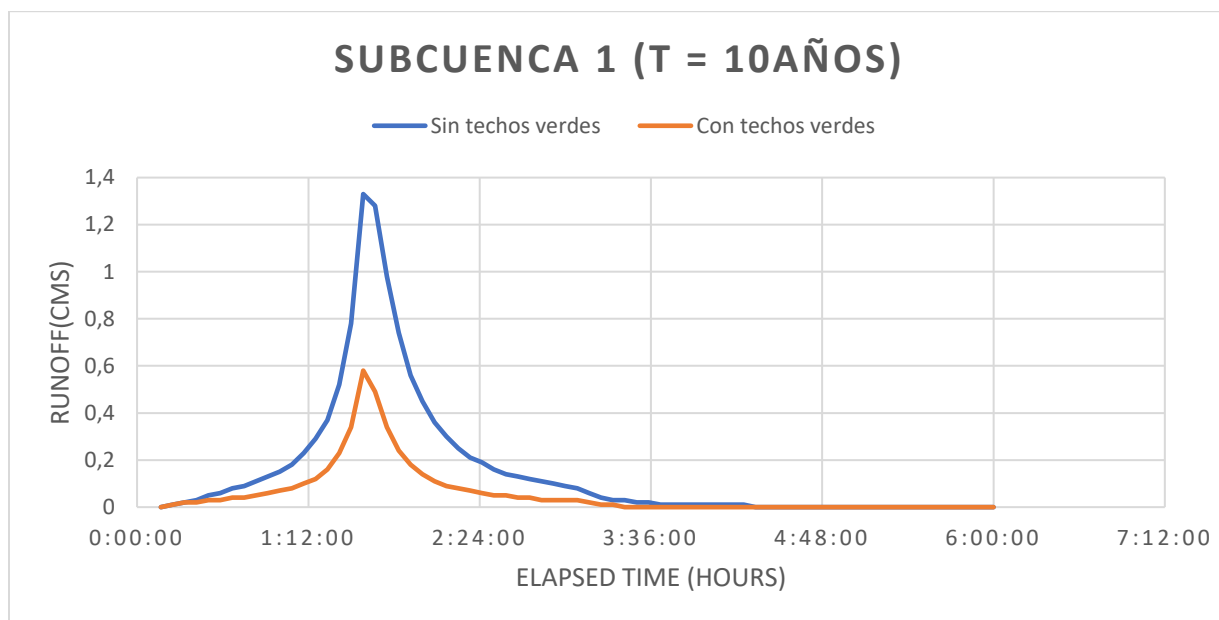
Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=5años)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 38

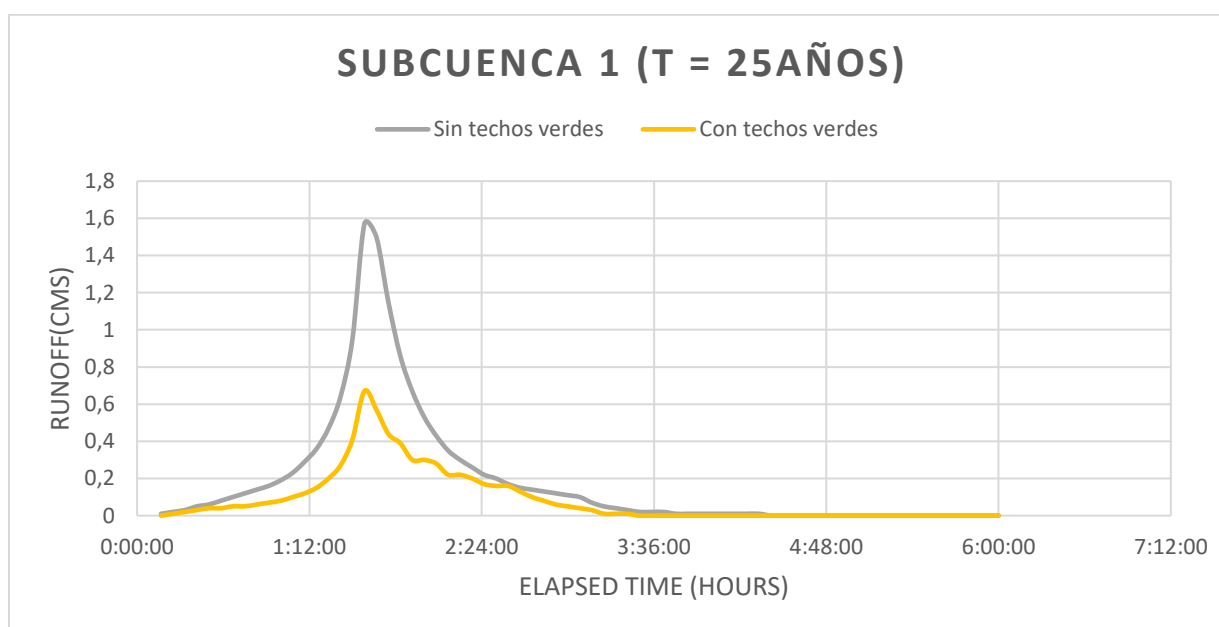
Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=10años)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 39

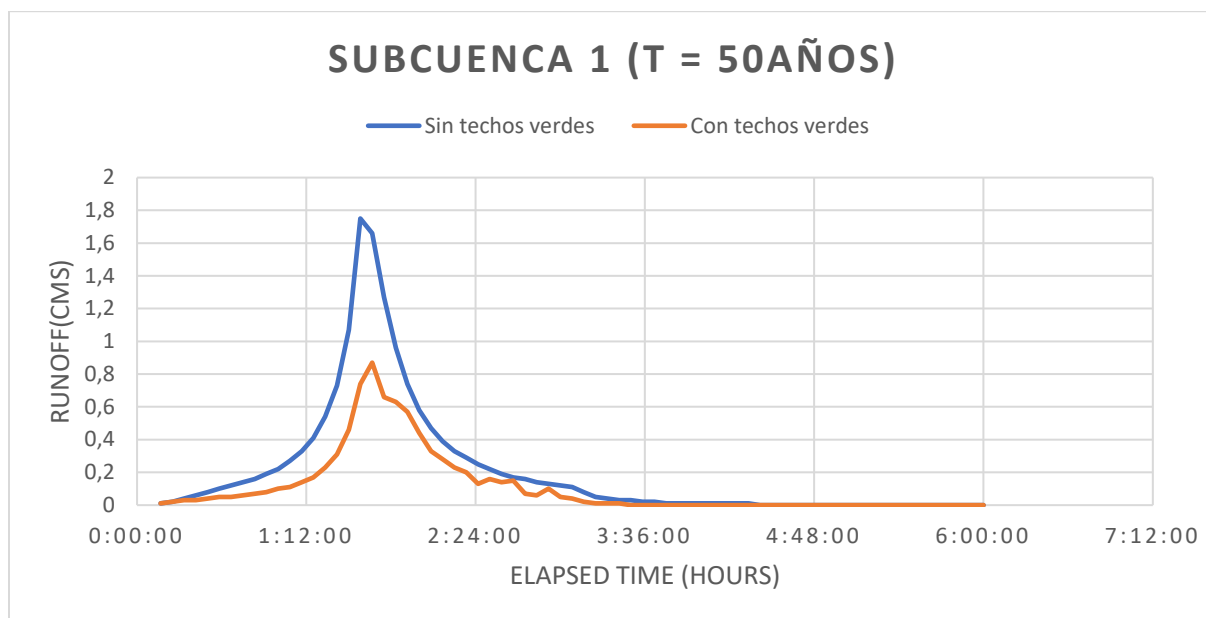
Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=25años)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 40

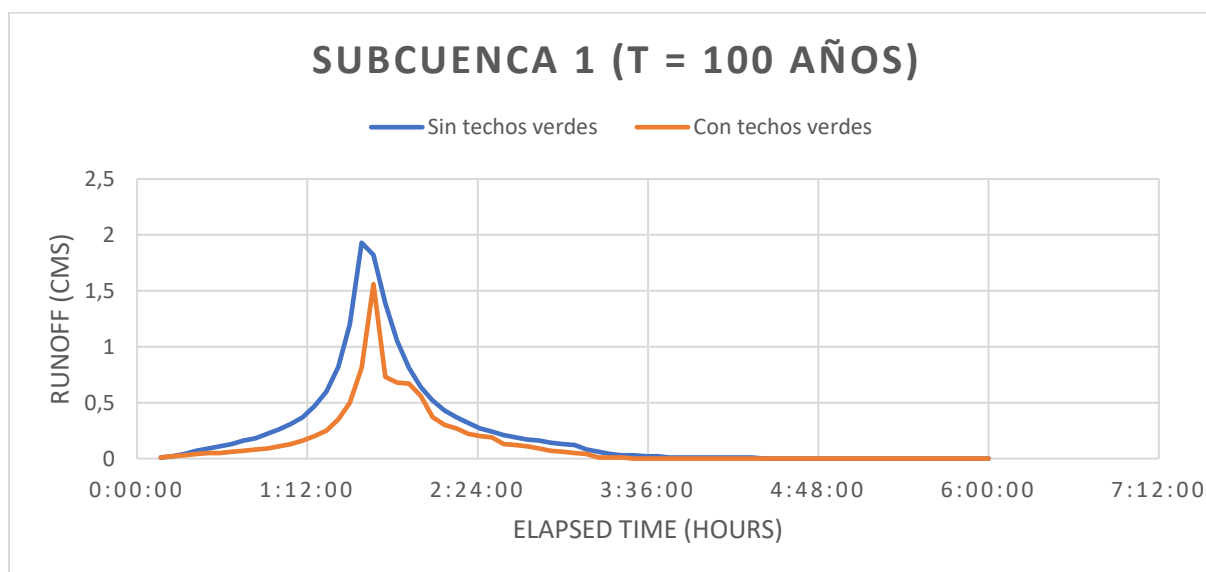
Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=50años)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Figura 41

Comparación del caudal de salida de la subcuenca 1 sin y con techos verdes (T=100años)



Nota. Tomado de (Autores, 2024)

Para la subcuenca 1 con un área de 3,99 ha se utilizaron techos verdes para las áreas residenciales y comerciales las cuales abarcan un 62,4% del área total de la subcuenca. Se puede observar que los primeros 50 años el caudal de salida disminuye considerablemente teniendo en cuenta que los techos verdes contribuyen a la retención de agua pluvial, muchas veces en mayor y menor medida dependiendo de la intensidad y duración del evento que se esté presentando, reduciendo así las inundaciones que se presentan en este tipo de sitios. Los techos verdes son una gran alternativa, ya que a medida que pasa el tiempo los sistemas de drenaje no dan abasto, por lo cual deben implementarse medidas externas y que mejor que adoptar los sistemas de drenaje sostenible SUDS, que además de ayudar con las lluvias, también garantizan mejor calidad de vida y contribuyen con el cuidado del medio ambiente.

La lectura acuciosa de la presente monografía no deja otro resultado que el inspirador reto de querer insistir en proyectar la masificación de esta iniciativa en todo aquel que desarrolla construcción en la zona urbana.

Es vital desde luego contextualizar todos los estudios y adaptarlos a nuestras condiciones locales, pero en hora buena, dado a la ocurrencia sin igual que presenta el cambio climático.

Otro reto consiste en hacer de techos verdes una posibilidad para el cultivo de productos agropecuarios discretos y de uso local o la ocurrencia de hacer espacios de recreación y turismo, explorando la dimensión de hacer plataformas o azoteas ecológicas.

Otra dimensión es, que el diseño arquitectónico atrape el residuo pluviométrico de estas plataformas para uso doméstico no potable, específicamente para el vertedero sanitario.

Haciendo uso del adagio popular que la práctica hace al maestro, tenemos certeza que la construcción continua de techos verdes nos facilitara adquirir una manipulación que además de la experticia que esto genera, de forma colateral tendremos estudios diversos, impactos variados, y hasta innovadoras formas de obtener mayores beneficios y solucionar subyacentes problemáticas. Es sin duda una puerta retadora para el mundo ingenieril en toda su gama.

Un ejemplo de lo anterior es conexas prácticas de ingeniería ambiental, ingeniería de alimentos, ingeniería de sistemas, ingeniería electrónica y las implicaciones modernas de la inteligencia artificial.

Podría considerarse incluso una plataforma interconectada de techos verdes y una cultura altamente ecológica dentro de la zona urbana, dedicada al cultivo de alimentos ecológicos o plantas medicinales.

Podría imaginar incluso una capa de techos verdes interconectados y debajo la macro ciudad, de paso considerar la simbiosis de los sistemas de recolección de energía solar, misma energía que pueda servir para mover las turbinas para ascender el agua recolectada por los residuos pluviométricos del sistema.

Conclusiones

Los techos verdes son una alternativa que está siendo aprovechada por los países desarrollados, ya que además de ayudar con la retención de las aguas pluviales también contribuye con la purificación del aire, además; regula la temperatura de los sitios donde son utilizados provocando un ahorro en la parte energética y promoviendo la biodiversidad de la zona.

Los techos verdes son una excelente opción como medios de drenaje sostenible cuando se tienen sistemas de drenaje convencionales ineficientes en el manejo de caudales de salida, esto se puede apreciar claramente en el modelado realizado a partir del software Epa Swmn donde la reducción de este caudal bajó considerablemente en los primeros periodos de retorno, siendo así de gran ayuda ante los eventos de inundación.

A largo plazo los techos verdes son más eficientes en productividad y económicamente sustentables, ya que por lo general la capa de vegetación evita los deterioros por radiación solar y las fluctuaciones térmicas aumentando la vida útil de la cubierta mitigando gastos de reparación o reemplazo de estos.

Las leyes y normativas nacionales como internacionales nos indican que el agua de salida de los techos verdes es apta para ser utilizada en sistemas de riego, pero no para consumo humano.

A pesar de que Sudamérica apenas está en auge de desarrollo, tanto Brasil como Colombia son países los cuales tratan de estar a la vanguardia en temas de sostenibilidad, siendo Bogotá la ciudad que más estudios ha realizado en nuestro país respecto a la implementación de los techos verdes.

Referencias

- Arnáiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. (Marzo de 2000). Tratamiento biológico de aguas residuales. *Revista Tecnología del Agua*. Recuperado el 8 de Junio de 2023, de <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/edar.pdf>
- Ávila, D. C. (2012). *Techos verdes como sistemas urbanos de drenaje sostenible*. Recuperado el 8 de Junio de 2023, de Repositorio Pontificia Universidad Javeriana: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/11131/MarchenaAvilaDianaCecilia2012.pdf?sequence=1>
- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 351-360. Recuperado el 15 de Agosto de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857410000029>
- Berretta, C., Poë, S., & Stovin, V. (2014). Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*, 374-386. Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169414000584>
- Cadavid, J. H. (2006). *Hidráulica de canales: Fundamentos*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3gqME66cnhwC&oi=fnd&pg=PA2&dq=hidráulica&ots=DhDHeWv295&sig=PpnE3CWvTPvsfr36Q4hG4C7pr-c#v=onepage&q=hidráulica&f=false>
- Castillo, J. L. (Noviembre de 2015). *Techos verdes como estrategia urbano arquitectónica para la recuperación de áreas verdes desplazadas caso: espacios para servicios de alimentos en la Av. Teziutlan Sur de la Col. La Paz Puebla Pue*. Recuperado el 8 de Junio de 2023,

de Repositorio Benemérita Universidad Autónoma de Puebla:

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/9065>

Catalano, C., Laudicina, V. A., Badalucco, L., & Guarino, R. (2018). Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? *Ecological Engineering*, 15-26. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857418300065>

Chen, C.-F. (2013). Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review. *Ecological Engineering*, 51-58. Recuperado el 8 de Junio de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857412004454>

Cruz, J. Q., & Salas, J. R. (2020). *Sistema de riego*. Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de Repositorio Universidad del Santa:

<https://www.calameo.com/read/006554050c07768d8cc7e>

Deng, Y. (2021). Pollution in rainwater harvesting: A challenge for sustainability and resilience of urban agriculture. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 1-8. Recuperado el 15 de Agosto de 2023, de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857410000029>

Domingo, A. M. (1997). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*. Universidad Politécnica de Madrid.

Recuperado el 8 de Junio de 2023, de <https://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>

Dong, J., Lin, M., Zuo, J., Lin, T., Liu, J., Sun, C., & Luo, J. (10 de Mayo de 2020). Quantitative study on the cooling effect of green roofs in a high-density urban Area A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production*, 1-12. Recuperado el 14 de Julio de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620301992>

Dong, J., Zuo, J., & Luo, J. (2020). Development of a Management Framework for Applying Green Roof Policy in Urban China: A Preliminary Study. *Sustainability*, 1-22.

Recuperado el 8 de Junio de 2023, de <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10364>

Dvorak, B. (Mayo de 2011). Comparative analysis of Green Roof Guidelines and Standards in Europe and North America. *Journal of Green Building*. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de

https://www.researchgate.net/publication/257925924_Comparative_Analysis_of_Green_Roof_Guidelines_and_Standards_In_Europe_and_North_America

FAO. (Abril de 2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia: opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura:

<https://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>

Follmi, D., Corpel, L., Solcerova, A., & Kluck, J. (2023). Influence of blue-green roofs on surface and indoor temperatures over a building scale. *Nature-Based Solutions*, 1-10.

Recuperado el 14 de Julio de 2023, de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772411523000289>

Gurovich, L. A. (1985). *Fundamentos y diseño de sistemas de riego*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=rfx9YVVVKQnsC&oi=fnd&pg=PA218&dq=sistema+de+riego&ots=NI_VDn_IdY&sig=R0AR6nvjfnE5KZzlcxquW7lWq50#v=onepage&q=sistema%20de%20riego&f=false

Hardin, M., Wanielista, M., & Chopra, M. (2012). A Mass Balance Model for Designing Green Roof Systems that Incorporate a Cistern for Re-Use. *Water journal*, 914-931. Recuperado

- el 13 de Agosto de 2023, de
https://www.researchgate.net/publication/277433637_A_Mass_Balance_Model_for_Designing_Green_Roof_Systems_that_Incorporate_a_Cistern_for_Re-Use
- Ismail, Z., Aziz, H. A., Nasir, N. M., & Taib, M. Z. (2012). Comparative Study on Green Roof Mechanism In Developed Countries. *2012 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications*, 678-683. Recuperado el 8 de Junio de 2023, de
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6422975>
- Jones, B. A. (14 de Agosto de 2023). *Irrigation*. Recuperado el 15 de Agosto de 2023, de Britannica: <https://www.britannica.com/technology/irrigation>
- Lesikar, B., & Enciso, J. (2000). Filtro de arena. *Agri Life Extension*. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de https://www.researchgate.net/profile/Juan-Enciso/publication/26904355_On-Site_Wastewater_Treatment_Systems_Sand_Filters_Spanish/links/55f87d2508ae07629dd71005/On-Site-Wastewater-Treatment-Systems-Sand-Filters-Spanish.pdf
- Mas, F. M., Sánchez, F. M., & Martín, B. M. (26 de Diciembre de 2018). Infraestructuras verdes y azules: estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático. *Cambio climático y sostenibilidad*. Recuperado el 8 de Junio de 2023, de
<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2350>
- Mohsen , S., Majid , H., Bruce , D., Farzaneh , B., Hamid , S., & Nasrin , A. (2022). *Sustainable green roofs: a comprehensive review of influential factors*. Obtenido de
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-23405-x>
- Monterusso, M., Rowe, D. B., Rugh, C. L., & Russell, D. (2004). Runoff water quantity and quality from green roof systems. *Acta Horticulturae*, 369-376. Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de

https://www.researchgate.net/publication/279905842_Runoff_Water_Quantity_and_Quality_From_Green_Roof_Systems

Mott, R. L. (1994). *Mecánica de fluidos aplicada* (Vol. IV). Naucalpan de Juárez, Estado de México: Prentice Hall Hispanoamericana. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de <https://deymerg.files.wordpress.com/2013/07/mecanica-fluidos-mott.pdf>

National Geographic. (2023). *Irrigation*. Recuperado el 10 de Agosto de 2023, de National Geographic: <https://education.nationalgeographic.org/resource/irrigation/>

Pamuru, S. T., Forgione, E., Croft, K., Kjellerup, B. V., & Davis, A. P. (2021). *Chemical Characterization of Urban Stormwater: Traditional and Emerging Contaminants*. Recuperado el 13 de Agosto de 2023, de Science direct: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271800/1-s2.0-S0048969721X00538/1-s2.0-S0048969721069631/am.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEAsaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIFCHGa052jdIyCOC%2Ff5bUvMvdVWBDNYskg0Uk8W5X2%2FAAiAJNPcFCC%2BME1kWOGiAZYHonHBsg%2BTOWrpag8VFtW>

Parizotto, S., & Lamberts, R. (2011). Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy and Buildings*, 1712-1722. Recuperado el 31 de Julio de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811000922>

Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Kazemi, F. (2014). Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian. *Science of the Total Environment*, 651-659. Recuperado el 31 de Julio de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969713011911>

- Reyes, S. A. (2014). *Evaluación del desempeño térmico de un techo verde y su efecto de aislamiento sobre la impermeabilización en cubiertas*. Recuperado el 14 de Julio de 2023, de Repositorio Uniandes:
<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/16893?show=full>
- Romera, E. R., & Santos, M. M. (2023). *Hidrología aplicada: Infiltración y humedad del suelo*. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de OpenCourseWare:
https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/47724/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_4.pdf
- Secretaría de Ambiente de Bogotá. (2023). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible*. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de Secretaría de Ambiente de Bogotá:
<https://www.ambientebogota.gov.co/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible>
- Secretaría Distrital del Ambiente. (2011). *Guía de Techos Verdes en Bogotá*. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de OPMAMSS: <https://opamss.org.sv/wp-content/uploads/2020/03/Guia-de-techos-verdes-Bogota.pdf>
- Seidl, M., Mirande, C., Saad, M., & Gromaire, M. C. (Septiembre de 2014). *The Potential Incidence of Green Roofs on Urban Runoff Quality*. Recuperado el 15 de Agosto de 2023, de Researchgate:
https://www.researchgate.net/publication/280889652_The_Potential_Incidence_of_Green_Roofs_on_Urban_Runoff_Quality
- Shafique, M., & Kim, R. (2017). Application of green blue roof to mitigate heat island phenomena and resilient to climate change in urban areas: A case study from Seoul, Korea. *Journal of Water and Land development*, 165-170. Recuperado el 14 de Julio de

2023, de <http://archive.sciendo.com/JWLD/jwld.2017.33.issue-1/jwld-2017-0032/jwld-2017-0032.pdf>

SPRI. (2017). *ANSI/SPRI VF-1: External Fire Design Standard for Vegetative Roofs*.

Recuperado el 7 de Junio de 2023, de SPRI: https://www.spri.org/download/ansi-spri_standards_2020_restructure/vf-1/ANSI_SPRI-VF-1_External-Fire-Design-Standard-for-Vegetative-Roofs_2017.pdf

Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2011). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 148-161. Recuperado el 31 de Julio de 2023, de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169411007347>

Talebi, A., Bagg, S., Sleep, B. E., & O'Carroll, D. M. (2019). Water retention performance of green roof technology: A comparison of canadian climates. *Ecological Engineering*, 1-15. Recuperado el 31 de Julio de 2023, de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857418303835>

Tan, P. Y., & Sia, A. (2005). A pilot green roof research project in Singapore. *Proceedings of 3rd North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*, 339-415. Recuperado el 14 de Julio de 2023, de <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=74155a08c8e73fef64eaf6b67d474ca1bb1d6fdc>

Tánago, M. G. (2023). *Escorrentías*. Recuperado el 8 de Junio de 2023, de Universidad Politécnica de Madrid:

http://ocw.upm.es/pluginfile.php/1231/mod_label/intro/Tema9.pdf

- Tovar, J. O. (2022). *Capítulo VII: Calidad de agua para riego*. Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de Repository Agrosavia:
https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/37104/Ver_Documento_37104.pdf?sequence=5&isAllowed=y#:~:text=En%20general%2C%20las%20caracter%2C%20que,del%20agua%20para%20riego%20son%3A&text=La%20concentraci%C3%B3n%20total%20de%20s%20
- Universidad de La Salle. (2020). *Guía para la visualización de datos: Bibliometrix*.
- Velandia, C. C., & Quiroz, L. C. (2021). *Techos verdes, una alternativa para el desarrollo sostenible de la Universidad Piloto de Colombia, sede Bogotá*. Recuperado el 7 de Junio de 2023, de Repository UniPiloto:
<http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/10292/Trabajo%20de%20Grado.pdf?sequence=1>
- Xiao, M., Lin, Y., Han, J., & Zhang, G. (2014). A review of green roof research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 633-648.
 Recuperado el 8 de Junio de 2023, de
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114005991>
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 7266-7273. Recuperado el 15 de Julio de 2023, de
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231008006262>
- Zhang, S., Lin, Z., Zhang, S., & Ge, D. (2021). *Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: Observational data and hydrological simulations*. Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de Journal of Environmental Management: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479721007441>