

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis de implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible
(cubiertas verdes y depósitos de infiltración) en la Ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Luis Diego Orellana De León para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



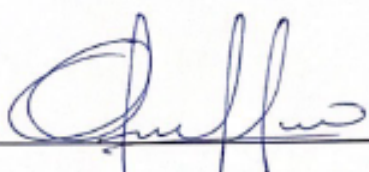
Análisis de implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible
(cubiertas verdes y depósitos de infiltración) en la Ciudad de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Luis Diego Orellana De León para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

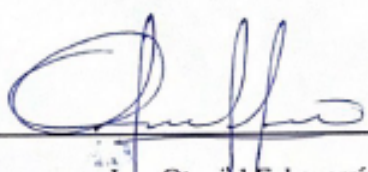
Guatemala,

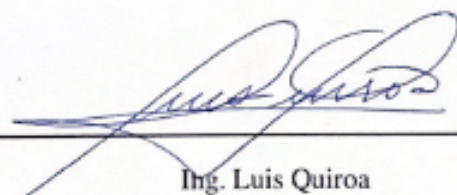
2023

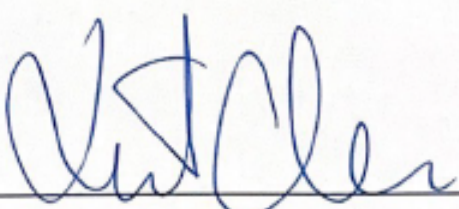
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Otoniel Echeverría

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Otoniel Echeverría

(f) 
Ing. Luis Quiroa

(f) 
Ing. Robert Godo

- Fecha de aprobación: Guatemala, 04 de diciembre de 2023.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
RESUMEN	XI
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS	5
A Objetivo general	5
B Objetivos específicos	5
IV. MARCO TEÓRICO	6
A Sistemas urbanos de drenaje sostenible	6
1 Antecedentes:	6
2 Concepto:	7
3 Ventajas:	8
4 Desventajas:	10
5 Tipología principal:	10
B Beneficios de los sistemas urbanos de drenaje sostenible:	11
1 Beneficios ambientales	12
2 Beneficios paisajísticos	12
3 Beneficios económicos	12
4 Beneficios sociales	13
C Cubiertas verdes	13
1 Antecedentes	14
2 Componentes	15
3 Beneficios	16

D	Criterios de diseño para cubiertas verdes	18
1	Tipo de naturación	18
2	Requisitos mínimos para la instalación de una cubierta verde	19
3	Vegetación	19
4	Drenaje	19
5	Tipos de composición de cubiertas verdes	20
6	Operación y mantenimiento	21
E	Depósitos de detención y/o infiltración	21
1	Componentes	25
2	Requisitos mínimos para la instalación de un depósito de infiltración	27
3	Operación y mantenimiento	27
F	Métodos de cálculo de tanques de detención y/o infiltración	28
G	Desarrollo urbano	29
1	Urbanización:	29
2	Desarrollo urbano en Guatemala:	29
H	Sostenibilidad	30
1	Concepto:	30
2	Sostenibilidad en edificaciones:	30
I	Hidrología	30
1	Concepto:	30
2	Modificación del ciclo natural del agua:	31
3	Escorrentía superficial	34
J	Contexto hídrico en Guatemala	38
1	Factores geofísicos del recurso hídrico	38
2	Disponibilidad de recursos hídricos	39
3	Demanda hídrica	40
4	Impactos	40
V.	METODOLOGÍA	41

A	Ubicación	41
B	Flujo de agua pluvial en la edificación	43
C	Diseño de cubierta verde	43
1	Sedum Japonicum	44
2	Sansevieria Trifasciata	45
3	Echeveria Elegans	45
4	Echeveria Pulvinata	46
5	Kalanchoe Tomentosa	46
6	Echeveria Lilacina	47
D	Dimensionamiento de un tanque de detención/infiltración	49
E	Dimensionamiento de tubería	52
VI.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55
VII.	CONCLUSIONES	58
VIII.	RECOMENDACIONES	60
IX.	BIBLIOGRAFÍA	62
X.	APÉNDICES	68
XI.	GLOSARIO	81

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Criterios establecidos por la Asociación Internacional de Azoteas Verdes.	18
2	Información Técnica AquaCell NG.	25
3	Valores de coeficientes de escorrentía.	36

LISTA DE FIGURAS

Ilustración		Página
1	Ciclo urbano del agua.	7
2	Cambio de suelo debido a proceso de urbanización.	10
3	Ejemplo de cubiertas verdes en una vivienda.	14
4	Componentes de una cubierta verde.	16
5	Ejemplo de depósitos de infiltración.	22
6	Tanque de celda geocelular AquaCell NG.	24
7	Ejemplo de sistema de infiltración.	26
8	Ejemplo de sistema de atenuación.	26
9	Ciclo hidrológico.	31
10	Ciclo urbano del agua.	34
11	Curvas IDF típicas de la estación climática INSIVUMEH.	37
12	Cuencas hidrográficas de la República de Guatemala.	39
13	Planta de techos de edificación	42
14	Planta de nivel 1. Ubicación en planta de tanque de detención.	42
15	Diagrama de flujo de agua pluvial	43
16	Sedum Japnicum.	44
17	Sansevieria trifasciata.	45
18	Echeveria Elegans.	45
19	Echeveria Pulvinata.	46
20	Kalanchoe Tomentosa.	46
21	Echeveria Lilacina.	47
22	Drainroof H6 Geoplast.	48
23	Curvas IDF típicas de la estación climática INSIVUMEH.	49
24	Diámetros comerciales de tuberías PVC.	53
25	Orificio sumergido.	54

26	Memoria de cálculo de duración máxima de precipitación en Ciudad de Guatemala.	68
27	Continuación de memoria de cálculo de duración máxima e inicio de cálculo de tubería de conexión.	69
28	Continuación de cálculo de tubería de conexión e inicio de cálculo de tubería de descarga de tanque.	70
29	Fin de memoria de cálculo de tubería de descarga de tanque de retención.	71
30	Memoria de cálculo de intensidades de lluvia preliminares.	71
31	Continuación de cálculo de caudales de diseño para dimensionamiento de tanque de retención.	72
32	Cálculo de celdas geocelulares de tanque de retención Aquacell NG.	72
33	Cálculo de volumen por dotación.	73
34	Continuación de cálculo de volumen de tanque por dotación.	74
35	Plano planta de techos con cubiertas verdes.	75
36	Plano de planta de nivel 1 con ubicación de tanque de retención.	76
37	Plano de sección de detalle de cubierta verde.	77
38	Detalle sección E; Ejes 7-13.	77
39	Detalle Sección F; J-P.	78
40	Detalle Sección E; 1-3.	78
41	Detalle sección F; Ejes C-I.	79
42	Planta Aquacell NG.	79
43	Elevación frontal Aquacell NG.	80
44	Elevación lateral Aquacell NG.	80

RESUMEN

La Ciudad de Guatemala sufre actualmente de diversas problemáticas hídricas. A pesar de que Guatemala cuenta con una gran disponibilidad de recursos hídricos, su abundancia es relativa. La mala gestión de los recursos hídricos es una de las razones por las cuales varias zonas de la ciudad cuentan con un servicio de agua irregular. Sin embargo, la mayor problemática en la ciudad es el aumento de impermeabilización y eliminación de superficies que faciliten la infiltración natural del agua. En el presente trabajo se proponen las cubiertas verdes y los depósitos de retención como solución inmediata ante estas problemáticas, debido a su alto rendimiento en la recuperación y retención de agua pluvial.

Para el análisis del funcionamiento e impacto de estos Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) es necesario tomar en cuenta los antecedentes hídricos, climáticos y urbanos de la zona, ya que su rendimiento se basa en el índice de precipitación de la zona, del clima, entre otras propiedades. Asimismo, la implementación de este sistema depende de criterios de sostenibilidad, de diseño y estructura. Teniendo en cuenta todos sus requisitos, se busca realizar un análisis del funcionamiento e impacto que estos sistemas generan en la ciudad.

Con su debido estudio, se pretende aplicar una metodología para el predimensionamiento hidráulico de la extensión de cubiertas verdes y depósitos de retención para el control de caudal, retención, infiltración y reúso del recurso hídrico. Tomando en cuenta el usos de varios elementos como el uso de vegetación con alta retención de agua y tolerancia al poco riego, se busca la implementación de un sistema de mantenimiento que logre el funcionamiento sostenible y de bajo impacto durante todo el año; especialmente en época de verano y en zonas con lluvia intermitente.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de población y la urbanización desencadenan problemáticas relacionadas con los recursos hídricos en la Ciudad de Guatemala. La contaminación, la mala gestión de drenaje y recursos hídricos y la impermeabilización del suelo son consecuencias que afectan a la población capitalina y al departamento de Guatemala en general. En algunas zonas de la ciudad, se suministra únicamente por una duración de 6 a 12 horas en días alternos. Actualmente, tampoco se encuentra un sistema de recarga de los mantos acuíferos que se utilizan como fuente principal de agua en la ciudad. En un país en vías de desarrollo, como Guatemala, las soluciones a largo plazo difícilmente llegan a efectuarse y brindar resultados. Una solución inmediata para satisfacer la necesidad de suministro de agua, en zonas con un servicio irregular, puede ser el uso de sistemas sostenibles de recuperación de agua pluvial.

Basados en la metodología de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), que utilizan materiales filtrantes ecológicos, se propone la implementación de cubiertas verdes y depósitos de infiltración para la recuperación de agua pluvial. Sistemas como el propuesto tienen diversos beneficios con respecto al control de escorrentía pluvial urbana, la reducción de contaminación del agua, el aprovechamiento del recurso pluvial, la creación de más espacios vegetados, entre otros. Siendo ya utilizados a nivel internacional, estos sistemas han demostrado alcanzar hasta un 78 % de retención de agua y recuperar la cantidad suficiente de agua para ser utilizada cuando el suministro municipal no funciona. Asimismo, han logrado alcanzar hasta un 50 % de reducción de escorrentía pluvial urbana. En una ciudad que tenga grandes problemáticas por inundaciones en épocas altas de lluvia, como la Ciudad de Guatemala, este sistema realmente podría ser de gran utilidad.

Sin embargo, el rendimiento de este sistema depende de las condiciones climáticas en donde se encuentre. Teniendo un período de lluvia de 8.1 meses al año y una intensidad en meses de época lluviosa de alrededor de 163 mm, la Ciudad de Guatemala se presta para la implementación de este sistema. Sin embargo, para épocas de verano o zonas con lluvia intermitente, estos sistemas que utilizan vegetación como parte de retención de agua, se presta para utilizar vegetación con alta retención de agua y que cuente con alta tolerancia al poco riego para su funcionamiento sostenible y de bajo impacto. Por otro lado, se necesitan tomar en cuenta los criterios estructurales y de diseño para la implementación segura del sistema.

II. JUSTIFICACIÓN

El aumento de población y de urbanización en Guatemala provoca cada vez más la impermeabilización, interrupción del proceso de infiltración del agua y la disminución del proceso de recarga hídrica. Estas y otras problemáticas son las causantes de la escasez de agua en algunas áreas del departamento de Guatemala; zonas de Villanueva, Mixco y la Ciudad de Guatemala ya están siendo severamente afectadas. En las zonas 3 y 4 de Villanueva los vecinos reciben el servicio de agua una o dos horas diariamente; en las zonas 5, 7 y 11 de Mixco reciben el servicio 2 horas cada dos días y en la zona 6 y zona 1 el agua llega 1 hora cada dos días (Ramos, 2019). Con respecto a la Ciudad de Guatemala, las zonas 21, 12, 7, 13, 1 y 18 presentan un horario de suministro de agua más irregular que en otras zonas; de 6 a 12 horas de servicio en días alternos (Morales et al., 2022). Se está volviendo una situación grave para los vecinos de estos municipios y convirtiéndose una realidad para otros de igual manera.

La abundancia de agua en Guatemala es relativa ya que, a pesar de la gran disponibilidad de recursos hídricos que posee la región, la capacidad de gestión del agua por parte de las entidades y la contaminación son problemáticas realmente tangibles y de gran magnitud. Guatemala utiliza únicamente del 10 al 20 % de sus recursos debido a la contaminación. La gravedad de la contaminación en el país se dimensiona observando únicamente el caso de uno de los cuerpos de agua más contaminados de la región, el Lago de Amatitlán. Dicho Lago recibe desechos de Guatemala, Mixco, Villa Nueva, San Miguel Petapa, Villa Canales, Santa Catarina Pinula y Amatitlán; un total de desechos de 2.2 millones de ciudadanos. Aunado a eso, la mala gestión del recurso hídrico se demuestra en que el 80 % de los sistemas de tratamiento del país funcionan intermitentemente, entre 6 a 12 horas al día; dando como resultado la purificación de solo el 15 % del agua total. Añadiendo que la operación y mantenimiento a cargo por la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA) da como resultado un 45 % de pérdidas físicas por fugas, tuberías insuficientes, entre otras.

(Lample y Zedek, 2020)

El uso del agua subterránea también juega un papel importante en el aprovechamiento de los recursos hídricos en Guatemala. Sin embargo, la expansión de obras residenciales crea la necesidad de la construcción de pozos no regulados; la cantidad de pozos no regulados duplica la cantidad de pozos regulados actualmente en la ciudad. Asimismo, la remoción de bosques durante los últimos

40 años han afectado el curso sostenible de recarga hídrica en los acuíferos (Lample y Zedek, 2020). Estas problemáticas llevan tantos años afectando a la población, que sus soluciones directas llevarían años en hacer efecto y revertir la situación para cada una de ellas.

El recurso hídrico pluvial, en comparación a otras fuentes de suministro de agua, es un recurso que está menos expuesto a altos niveles de contaminación. En la Ciudad de Guatemala se tiene un período de lluvia de 8.1 meses al año con una intensidad mínima promedio de 12.7 mm al mes; en los meses con mayor intensidad, como septiembre, se encuentra un mínimo de 162.56 mm (Weather Spark, 2022). El recurso pluvial genera el agua suficiente para ser almacenada y utilizada durante una fracción del año al ser necesitada cuando hay escasez de agua por parte del abastecimiento municipal, ahorrar costos y crear espacios con vegetación que respeten más el ciclo natural del agua. Por lo que en esta investigación, se propone el uso del recurso hídrico pluvial como otra fuente de suministro de agua en la vivienda.

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) tratan de cubiertas ecológicas, pavimentos permeables, jardines de lluvia, sumideros filtrantes, canales permeables, entre otros elementos. Algunas de las funciones principales de los SUDS es la creación de ciudades que beneficien al ciclo hidrológico al contrarrestar las consecuencias de la urbanización y crear espacios de retención de agua pluvial para reducir la escorrentía pluvial urbana, entre más beneficios (Martínez, 2013). En el caso de las terrazas y cubiertas verdes, su rendimiento depende totalmente de su ubicación, de su tipo y área de retención. Se ha demostrado que un sistema con plantas de bajo riego logra alcanzar un 78 % de retención de agua y, un 17 % a 50 % de reducción de escorrentía (Talebi et al., 2018). Además, este sistema mejora el aislamiento térmico y acústico, e incrementa la vida útil de la cubierta.

En un país como Guatemala, el aspecto económico es primordial en el avance de proyectos. La implementación de SUDS obtiene un ahorro global en los costos de la gestión del agua pluvial al ser sistemas de detención y almacenamiento más sencillas (García y Thomas, 2014). Respecto al sistema de tratamiento de agua pluvial, este suele ser más económico debido a su menor exposición a contaminantes externos. Siendo el proceso de filtración con carbón natural y el proceso de desinfección solar algunos de los procesos con mayor efectividad en remoción de materia orgánica y otros agentes (Hernández y Chaparro, 2020).

En conclusión, los sistemas sostenibles de recuperación de agua pluvial como los SUDS propor-

cionan beneficios ambientales, económicos y sociales, al captar agua mediante materiales filtrantes sostenibles. La implementación de cubiertas verdes y depósitos de infiltración, que son actualmente aceptados y utilizados a nivel internacional, pueden ser una respuesta a corto plazo para problemáticas asociadas con el crecimiento de las ciudades y la mala gestión de drenaje y recursos hídricos de algunos departamentos de Guatemala. O bien, ser una solución provisional mientras que la condición de estas problemáticas se revierte a través de propuestas de impacto directo, pero tardío.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Evaluar el funcionamiento e impacto de un sistema urbano de drenaje sostenible, conformado por cubiertas verdes y depósitos de infiltración, en una edificación ubicada en la Ciudad de Guatemala, relacionando los parámetros y condiciones propias de la zona.

B. Objetivos específicos

- Definir los requisitos para la instalación de un sistema urbano de drenaje sostenible, conformado por cubiertas verdes y depósitos de infiltración, en parques, plazas, terrazas y/o cubiertas.
- Aplicar una metodología para el predimensionamiento hidráulico de la extensión de cubiertas verdes y depósitos de infiltración como sistema de retención de agua pluvial.
- Analizar la viabilidad en términos de recursos que requiere la implementación de un sistema urbano de drenaje sostenible, conformado por cubiertas verdes y depósitos de infiltración.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Sistemas urbanos de drenaje sostenible

1. Antecedentes:

El incremento de inundaciones, erosión, contaminación de los cuerpos naturales de agua y la descarga precipitada de los mantos acuíferos fueron de las problemáticas principales que desencadenaron el concepto de los SUDS. En el caso de las inundaciones, se dieron debido a la sobrecarga en los sistemas de drenaje y alcantarillado de las ciudades; normalmente sistemas desactualizados que fueron diseñados para soportar la demanda hídrica de una población inferior a la actual. La solución más "fácil" sería aumentar el diámetro de las tuberías, pero es una intervención costosa e invasiva.

(Casavonne, 2012)

Actualmente los sistemas de drenaje de agua pluvial en las ciudades principales están conformadas por redes de alcantarillado, en su mayoría, de estructuras de concreto. Estas tuberías tienden a presenciar un creciente deterioro impactando directamente en los cuerpos naturales de agua. Asimismo, esto genera la necesidad de crear e implementar nuevos sistemas para la gestión de agua pluvial de una manera más eficiente.

Los tres factores que impactan principalmente en la gestión de agua pluvial son: cantidad, calidad y la cultura urbana. La cantidad de escorrentía superficial ha aumentado debido al progreso de la impermeabilización por urbanización. Los niveles de escorrentía sobrepasan la capacidad de evacuación de los sistemas de drenaje existentes y crean inundaciones. En el caso de la calidad, debido a que la escorrentía superficial recorre por calles, techos, plazas y por toda la ciudad, esta arrastra una gran cantidad de contaminantes. Afectando directamente a los cuerpos de agua que muchas veces, no reciben aguas provenientes de plantas de tratamiento. Por último, la cultura urbana no contempla normalmente el aprovechamiento del agua pluvial. No toman en cuenta muchas veces la necesidad de espacios verdes y que al mismo tiempo, recuperen agua pluvial.

(Parra, 2022)

2. Concepto:

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son elementos que conforman el sistema de drenaje de las ciudades y tienen como objetivo la reducción de escorrentía pluvial urbana; las siglas provienen del inglés "Sustainable Urban Drainage Systems". Estos sistemas se catalogan dentro del concepto de Desarrollo Urbano Sostenible, que consideran la problemática asociada al drenaje urbano en el planeamiento urbanístico. Una gran parte de estos sistemas pueden asociarse con infraestructuras verdes, que utilizan la vegetación como elemento de control y regulación del agua pluvial. Su especialidad es la selección e implementación de técnicas de drenaje urbano sostenible, como el diseño de una red de drenaje, y al mismo tiempo incluyendo factores relacionados con el urbanismo, el paisajismo y la ecología.

(Abellán, 2013)



Figura 1. Ciclo urbano del agua.

Fuente: Díaz, J. B., Mólgora, C. C., Herrera, A. G., De Lourdes Rivera Huerta, M., Castrejón, S. P., Mendoza, I. V., Luna, C. S., Domínguez, A. M., & Soberanis, M. P. (2021). Cerrando el ciclo urbano del agua. *Perspectivas IMTA*, 2(15). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-15>

Tienen como objetivo reproducir o bien, restituir los procesos hidrológicos naturales afectados por el desarrollo urbanístico; como lo son la infiltración, filtración, evapotranspiración, entre otros. Tienen énfasis en el aprovechamiento del agua pluvial, reducir el caudal de agua dirigido a plantas de tratamiento, la adaptación y mitigación al impacto del cambio climático y, el reforzamiento del uso de espacios verdes para la conservación de la biodiversidad. (Conama, 2018)

El concepto inició en la década de 1960 e internacionalmente aumentó el uso de este término alrededor de la década de 1990 (Fletcher et al., 2014). Este nuevo concepto es resultado de una evolución del desarrollo de los sistemas de drenaje de agua pluvial. Mejora, no solo el tema de cantidad sino que también la calidad del agua de pasar de un sistema de "drenaje.^a un sistema de "manejo sostenible". (Parra, 2022)

Los SUDS deben contar con un diseño que contemple los siguientes cuatro factores:

- Calidad: Diseño que contemple algún sistema de remoción de contaminantes en el agua pluvial y cumplir con la responsabilidad ambiental.
- Cantidad: Reducir el caudal de escorrentía superficial que afecta los sistemas desactualizados y controlar los casos de inundaciones urbanas.
- Servicios: Deben tener un diseño que preste servicios de oferta hídrica y también con efectos positivos en el tema paisajístico, ambiental, térmico, recreativo, entre otros.
- Biodiversidad: Preserva el ecosistema de la zona al proporcionar más espacios verdes a las ciudades de concreto. Restaurar parte del paisaje verde y natural a las ciudades.

(CIRIA, 2015)

3. Ventajas:

Los beneficios que estos tipos de sistemas ofrecen se pueden dividir en distintas categorías. Entre los beneficios principales se encuentran aquellos que se relacionan directamente con el recurso hídrico, como: la reducción de volúmenes de escorrentía mediante elementos de retención y laminación, mejorar la calidad de las aguas receptoras de escorrentías urbanas, permitir el aprovechamiento del recurso hídrico captado para el consumo humano, la reducción del consumo de agua de red,

entre otras. Por otro lado, se logran encontrar beneficios relacionados con la estética y comodidad del usuario, como: el aislamiento térmico dentro de las edificaciones que implementen sistemas vegetados, un aumento del paisaje con la integración de cursos de agua y vegetación en el entorno, entre otras.

(Gazpio, 2015)

Para maximizar los beneficios de los SUDS, el manejo de la escorrentía superficial debe ser considerada desde un inicio en el desarrollo del proceso de planificación. Dependiendo de las características del sitio, los SUDS pueden adaptarse a estas mismas y obtener un resultado equilibrado con vegetación y el manejo sostenible del agua. Inclusive en los espacios más pequeños, los SUDS pueden adaptarse al espacio que se les proporciona. El uso de SUDS para el manejo sostenible de la escorrentía superficial puede apoyar en lo siguiente:

- El manejo del riesgo de inundaciones al controlar el volumen y frecuencia de flujo.
- La preservación y el apoyo de los hábitats y biodiversidad por medio del control de contaminantes.
- La creación de hábitats sostenibles por medio del uso de SUDS con vegetación.
- El uso prudente de recursos hídricos por medio de la implementación de sistemas de recuperación de agua pluvial.
- La preservación de recursos hídricos por medio de la protección del uso de suelo y la calidad del agua superficial.
- El uso sostenible de los recursos naturales por medio de la reducción de su uso en diseños de SUDS.

(CIRIA, 2015)

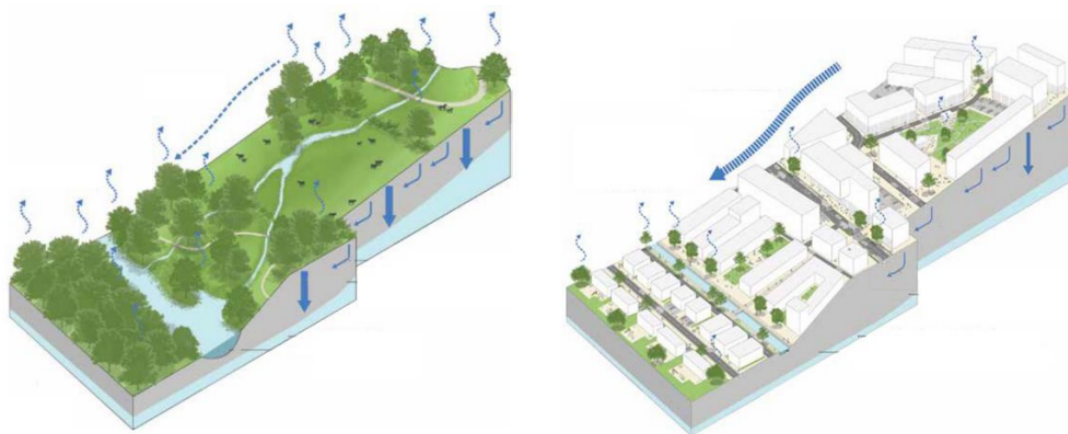


Figura 2. Cambio de suelo debido a proceso de urbanización.

Fuente: CIRIA. (2015). C 753 The SUDS Manual. Londres, UK: CIRIA

4. Desventajas:

A pesar de la gran cantidad de beneficios que tienen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, siempre cuentan con ciertos inconvenientes debido al corto tiempo de implementación que estos tienen a nivel internacional. La aplicación es limitada debido a la falta de práctica por parte de los diseñadores. Existe la inexperiencia en el sector para su debida ejecución. Asimismo, necesita un mantenimiento distinto al utilizado en técnicas de drenaje convencional. Hay una escasez de manuales específicos para distintas zonas climáticas con diferentes patrones pluviométricos. Aún no existen indicadores de rendimiento adecuados a largo plazo.

(Abellán, 2013)

5. Tipología principal:

Existe una gran variedad de tipos de sistemas urbanos de drenaje sostenible. Sin embargo, hay diferentes formas de clasificar estos sistemas. Se pueden clasificar por: la clase de construcción, cómo tratan la contaminación del agua, si funcionan dónde se genera la escorrentía o el control en vertido. Usualmente, se utiliza la función o el objetivo principal para clasificar estos sistemas:

- Medidas de infiltración: Estos sistemas tienen como objetivo principal trasladar el agua captada, sin importar su origen, hacia el subsuelo. Es decir, permitir el proceso natural de la infiltración del agua. Por ejemplo: pozos, zanjas y depósitos de infiltración.
- Medidas de filtración: Estos sistemas poseen el único objetivo de filtrar el caudal y retener partículas de este. Algunos sistemas utilizan vegetación, geotextiles o bien, un suelo preparado. Algunos ejemplos son las áreas de biorretención y las zanjas filtrantes.
- Medidas con uso de vegetación: Estos sistemas pueden tener distintas funciones, tales como gestionar la calidad del agua de la escorrentía o retenerla. Estas tienen la característica de utilizar la vegetación para lograr su objetivo. Algunos ejemplos pueden ser las áreas de biorretención, cubiertas verdes o los humedales.
- Medidas de detención y retención: Estas están diseñadas para almacenar el agua de escorrentía. Se pueden utilizar técnicas subterráneas o superficiales. Entre algunos ejemplos, se encuentran los depósitos y estanques de infiltración.

(Abellán, 2015)

Por otro lado, los SUDS también se pueden dividir en dos grupos principales: medidas estructurales y no estructurales (Villareal, 2005). Los sistemas con medidas estructurales son los que gestionan la escorrentía por medio de procesos que contemplen algún elemento constructivo y adopten criterios urbanísticos. Las medidas no estructurales son aquellas que no dependen directamente de la construcción de la infraestructura, sino que enteramente del mantenimiento del sistema.

(Parra, 2022)

B. Beneficios de los sistemas urbanos de drenaje sostenible:

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible son generalmente implementados debido a la obtención de beneficios ambientales. Sin embargo, los SUDS poseen otros beneficios que los hacen tener un mayor atractivo dentro del mercado. Los tipos de beneficios dependen del tipo de sistema que se utilice. Algunos sistemas tienen un mayor impacto social, económico, estético o bien, de salud, que otros.

1. Beneficios ambientales.

Los SUDS fueron diseñados principalmente para contrarrestar el impacto ambiental del desarrollo urbano sobre el territorio natural. Con la urbanización, cada vez hay menos superficie natural que permita el proceso natural de infiltración de agua hacia los mantos acuíferos.

Por lo tanto, la aplicación de los SUDS logra contribuir en la reducción de volumen de escorrentía superficial y caudales máximos provenientes de zonas urbanas. Contribuyen a mejorar la calidad y mantener la cantidad del agua receptada de escorrentías urbanas y minimizando la carga contaminante hacia los receptores naturales. Asimismo, enriquece la biodiversidad al aumentar la cantidad de humedales.

Los SUDS que utilizan vegetación también ofrecen otro catálogo de beneficios como: la reducción del efecto “isla de calor” en las ciudades al contrarrestar el aumento de temperatura resultante de la superficie pavimentada y estructuras de concreto. Asimismo, algunos tipos de SUDS contribuyen a la disminución de contaminación auditiva al tener la función de aislamiento auditivo.

(Abellán, 2013)

2. Beneficios paisajísticos.

En la parte estética de la ciudad, los SUDS pueden contribuir con el aumento de uso de vegetación y recurso natural. De esta manera, se agrega un visual más natural a las ciudades que, regularmente, están repletas de obra gris (Abellán, 2013). Asimismo, apoya la creación de más zonas de recreación natural en la ciudad como: jardines, plazas naturales, parques naturales, etc. Estos beneficios también influyen en la calidad de vida de la población e impacta positivamente en la salud de esta.

3. Beneficios económicos.

Los SUDS pueden proporcionar beneficios económicos a largo plazo, dependiendo de la zona en las que se implementan. En distintos estudios de caso de estos sistemas, se han generado resultados optimistas en cuestión a los beneficios económicos que estos pueden proporcionar. El beneficio económico depende totalmente del tipo de SUDS que se esté utilizando. Sin embargo, en el caso

de las cubiertas verdes, estas pueden evitar costos en el uso de calefacción o aire acondicionado en edificaciones. Además, que su uso da un incremento en el valor de la propiedad. Asimismo, reduce costos por prevención y daño por inundaciones. En el caso de los depósitos de infiltración, estos proporcionan reducción de costos en la prevención y daños por inundaciones; también aumentan el valor del terreno y de la propiedad.

(CIRIA, 2013)

4. Beneficios sociales.

Los beneficios sociales de los SUDS van de la mano con los beneficios ambientales que estos proporcionan. Así como los demás tipos de beneficios, estos dependerán totalmente del tipo de SUDS que se utilice. Sin embargo, en general los SUDS están diseñados para proporcionar beneficios en salud y bienestar urbano. Algunos factores que afectan hoy en día la salud de las ciudades pueden ser contrarrestados por medio de estas tecnologías. En el caso del impacto de la contaminación del aire; la esteticidad del área; el control de temperatura; proporción de trabajo; disminución de inundaciones; mejoras en la salud física, emocional y mental de la población; disminución de accidentes de tránsito y entre otros beneficios.

(Horton et al., 2015)

C. Cubiertas verdes

Tienen como objetivo principal la implementación de vegetación en la superficie de las edificaciones para la obtención de diversos beneficios. A través de estos sistemas se logra reducir la escorrentía superficial de la zona y evitar una escorrentía directa como se logra encontrar en las cubiertas convencionales. Al producir una ralentización de la escorrentía, se logra retener parte del agua por las plantas a través de su absorción para luego ser trasladada el agua para su debido almacenamiento. Por otro lado, las cubiertas verdes pueden mejorar el rendimiento térmico de los edificios. Esto genera un ahorro de costos de energía debido a que las plantas y el sustrato enfrían el techo por medio de la evapotranspiración durante los meses de verano. Por otro lado, de tener una cantidad suficiente de cubiertas verdes en la zona urbana, se podría combatir el efecto de la isla de calor urbano y mejorar la calidad del aire al capturar partículas de polvo. (Seco, 2017)



Figura 3. Ejemplo de cubiertas verdes en una vivienda.

Fuente: EcoHouses. (s.f.). 6 ejemplos de arquitectura sostenible con tejados verdes. EcoHouses. <https://www.ecohouses.es/6-ejemplos-de-arquitectura-sostenible-con-tejados-verdes/?lang=es>

1. Antecedentes.

Las cubiertas verdes y los jardines en cubiertas han existido desde hace miles de años, pero se ha revelado que sus propósitos han sido variados; desde cualidades aislantes hasta por beneficios antiestrés. Se ha tenido registro de su uso en distintas partes del mundo y en épocas distintas.

Teniendo registro de los jardines en cubiertas más antiguos en los Zigurats de la antigua Mesopotamia, construidos desde el cuarto milenio hasta 600 A.C. Se plantaban árboles y arbustos en terrazas planas para facilitar la subida y ofrecer sombra del calor de Babilonia. El ejemplo más famoso de la antigua Babilonia fueron los Jardines Colgantes de Babilonia, el cual fue un regalo de Rey Nabucodonosor II hacia su esposa, Amitis de Media.

Del 371 al 287 A.C. el botánico Romano Teofrasto registró la presencia de Siemprevivas en muros y tejados. Carlomagno ordenó que se sembrara una planta en cada techo, debido a la creencia que protegía de los incendios y rayos.

Durante la Edad Media y el Renacimiento, los jardines en cubiertas fueron utilizados por la clase alta y los monjes Benedictinos. Asimismo, los Noruegos utilizaron tierra y distintas especies de

césped en sus techos como aislamiento térmico desde los 1600 hasta los 1800.

Alemania es conocido como el lugar de nacimiento de los sistemas de cubiertas verdes modernos. En 1880, Alemania experimentó rápida urbanización e industrialización. Debido a que se utilizaba alquitrán en techos, se comenzó a aplicar sustratos de arena o grava para reducir el peligro a incendios. Con el tiempo, se produjo la colonización de semillas y se formó césped para 1980. Debido a la Gran Depresión y la Segunda Guerra Mundial, el uso de cubiertas verdes fue casi inexistente.

A comienzos de la década de 1960, la tecnología de cubiertas verdes volvió a ser investigada y desarrollada en varios países. Para 1989, 1 millón de metros cuadrados fueron instalados en Alemania; 10 veces más para 1996. Actualmente, las cubiertas verdes están siendo más comúnmente utilizadas en los EE. UU. La introducción de esta al ambiente urbano americano ha sido reciente, ganando popularidad en las últimas décadas. La “Association of Standards and Testing Materials” (ASTM) ha lanzado diversas guías para describir las características de diseño para cubiertas verdes en Norteamérica. (Magill et al., 2011)

2. Componentes.

Este sistema está conformado por distintos elementos con una función específica cada uno:

- Estructura soportante: Es el elemento que soportará el sistema, el cual debe de contar con los criterios necesarios para soportar adicionalmente la carga del sistema. Debe contar con una inclinación mínima del 2 % para asegurar el viaje de aguas hacia los puntos de drenaje.
- Impermeabilización: El objetivo de esta capa es asegurar que el agua no entre en contacto con la estructura de soporte y mantener el soporte seco y libre de humedad. La reparación de este elemento es la más difícil debido a la restricción de acceso, por lo que se recomienda una debida instalación de esta. Usualmente, se utilizan membranas de: Etileno propileno dieno termo polímero, líquida de poliuretano, Poliolefina termoplástica combinada con caucho de propileno y etilpropileno y, lámina de PVC.
- Drenaje de agua: Esta capa permite el drenaje de exceso de agua y evitar la acumulación de agua en el sistema. Mantiene únicamente el agua necesaria para permitir el crecimiento de la capa vegetal del sistema. Se pueden utilizar grava y arena, o bien sistemas plásticos perfilados.

- **Filtración:** Forma parte de la capa de drenaje, pero tiene otras funciones separadas del objetivo del drenaje de agua. Retiene partículas de mayor y menor tamaño que puedan obstaculizar el drenaje. Se suelen utilizar alfombras de fibras poliéster livianas y resistentes al agua o alfombras de polietileno o propileno.
- **Sustrato:** Es la capa en la que se va a propiciar el crecimiento de las plantas. En esta capa se debe mantener la cantidad de agua suficiente para mantener las plantas en buen estado. Se compone en cuatro componentes: material inorgánico o agregados, material orgánico, agua y aire.
- **Vegetación:** Es la capa vegetal donde se desarrolla la vida vegetal utilizada en el sistema. El tipo de vegetación depende del clima, el área de extensión y su medio de crecimiento.

(About Haus, 2023)

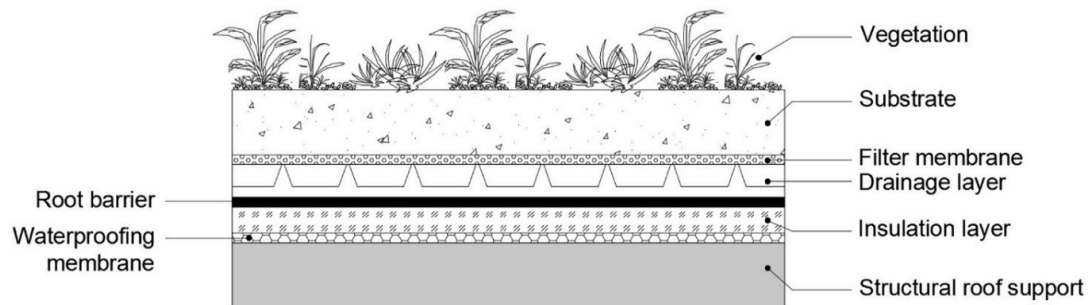


Figura 4. Componentes de una cubierta verde.

Fuente: Carrera, D., Lombillo, I., Carpio-García, J., & Blanco, H. (2022). Assessment of different combinations of substrate-filter membrane in green roofs. *Journal of Building Engineering*, 45, 103455.

3. Beneficios.

a. En general

En términos generales, las cubiertas verdes tienen un mayor impacto en el rubro ambiental. Las cubiertas verdes tienen un fuerte impacto en el aislamiento térmico y comportamiento hídrico. En

el tema del aislamiento térmico, esta logra reducir el consumo de energía para enfriamiento y/o calefacción; esto conlleva a reducción de emisiones de CO₂. Asimismo, contribuyen a la disminución de temperatura por parte de las superficies urbanas y modera el efecto *Isla de calor* en verano. En términos de comportamiento hídrico, las cubiertas reducen la escorrentía al retrasar la llegada del agua pluvial a la red de drenaje urbana y en el momento de grandes torrenciales, estas no se saturan. Por otro lado, las cubiertas también filtran el polvo y la contaminación y, mejoran la calidad de aire de la ciudad. Por último, mejora la calidad de vida de los habitantes de la ciudad por medio del valor estético, calidad visual y la creación de más áreas para especies nativas o migratorias.

(About Haus, 2023)

b. Comportamiento térmico

Con respecto al aislamiento térmico en techos, se ha demostrado que las cubiertas verdes pueden conseguir una amortiguación térmica hasta de 6°C en condiciones exteriores de altas temperaturas y con radiación solar directa sobre la cubierta. Por otro lado, trabajos previos de investigación y monitoreo en condiciones de clima tropical obtuvieron como resultado, que una cubierta con un espesor de 10 cm de sustrato, puede retrasar aproximadamente cuatro horas la transmisión de calor entre el exterior e interior de una habitación (Vecchia, F *et al.*, 2006). Por lo tanto, el uso de cubiertas verdes permite un alto confort térmico en períodos de altas temperaturas, que normalmente comprometen la percepción de las temperaturas ambientales por dentro de las edificaciones.

Caso contrario, en época de invierno, las cubiertas verdes actúan como aislante térmico y tiene una pérdida de calor menor. En climas fríos, la transmisión de calor por medio de un techo con una cubierta verde extensiva se reduce entre un 10 % y 30 % y en época de verano entre un 70 % y 90 %. Por lo que, las cubiertas verdes son más eficientes para épocas de altas temperaturas. En un estudio realizado en Ottawa durante época de verano, la membrana expuesta a la intemperie alcanzó una temperatura de 70°C, pero en la última membrana alcanzó únicamente una temperatura de alrededor de 30°C (Liu, K & Baskaran, B., 2003). La disminución de temperaturas superficiales logra aumentar la vida útil de la membrana, debido a que no sufre altas dilataciones por la radiación solar directa a la que esta expuesta la cubierta ni a los altos cambios de temperatura.

D. Criterios de diseño para cubiertas verdes

Sea una cubierta verde o no, una losa debe ser diseñada para no comprometer la integridad del edificio. Se requiere de un buen cálculo de la estructura para lograr albergar las cubiertas verdes, ya que un diseño mal elaborado puede tener consecuencias catastróficas. Se debe considerar la carga adicional que se somete a la estructura al construir el sistema de cubiertas verdes. Debe considerarse el peso muerto que genera el sistema de cubiertas verdes, específicamente el peso de la membrana de aislamiento, el peso de las plantas y la tierra. (Toj, 2016)

1. Tipo de naturación.

- Extensiva: Para este tipo, su mantenimiento es bajo y el espesor no debe ser mayor a los 8 cm, debe contar con una carga permanente que ronde entre los 110 y 140 kg/m² en estado saturado.
- Semi intensiva: Para este tipo, su mantenimiento es normal y requiere con un mínimo de 15 cm de espesor, debe contar con una carga permanente en estado saturado que ronde entre los 150 y 250 kg/m².
- Intensiva. Para este tipo, su mantenimiento frecuente y requiere de un espesor mínimo de 20 cm, debe contar con una carga mayor a los 250 kg/m² en estado saturado. (Toj, 2016)

	Naturación extensiva	Naturación semi-intensiva	Naturación intensiva
Mantenimiento	Bajo	Periódicamente	Alto
Riego	No	Periódicamente	Regularmente
Vegetación	Hierbas y pastos	Hierbas y arbustos	Césped, arbustos y árboles
Sistema de acumulación	60 a 200 mm	120 a 250 mm	150 a 400 mm; en garajes subterráneos > 1000 mm
Peso	110 a 140 kg/m ²	150 a 250 kg/m ²	Mayor a 250 kg/m ²
Costos	Bajo	Medio	Alto
Uso	Capa de protección ecológica	Techo verde diseñado	Parque como jardín

Cuadro 1

Criterios establecidos por la Asociación Internacional de Azoteas Verdes.

Fuente: Toj, J. (2016). Propuesta de una Guía para la Planificación, Diseño e Instalación de un techo verde. Universidad de San Carlos de Guatemala, 49-52

2. Requisitos mínimos para la instalación de una cubierta verde.

- Estabilidad y resistencia mecánica: Los sistemas de cubiertas verdes deben contar con estabilidad y resistir las cargas consideradas en el cálculo estructural de la edificación. Es imprescindible garantizar el correcto comportamiento estático y estructural en su conjunto.
- Impermeabilidad: El sistema de cubiertas verdes debe poseer las características adecuadas que impidan que el agua llegue al interior de la edificación.
- Resistencia a la acción de las raíces sobre la estructura: Se deben utilizar los materiales adecuados para la construcción e implementación de cubiertas verdes. Se debe garantizar que las raíces de la capa de vegetación no penetren la membrana impermeabilizante para evitar daños en la estructura de la edificación.

(Toj, 2016)

3. Vegetación.

Para sistemas extensivos, las plantas requieren tener raíces poco profundas y la capacidad de almacenar agua por un gran período de tiempo; se recomienda la familia de suculentas Sedum y otras familias de plantas como la Portulacaceae, Crassulaceae y Euphorbiaceae. Para semi-intensivas, las vegetaciones requieren de un medio más profundo para crecer; se recomiendan las plantas herbáceas y arbustos. Para intensivas, la vegetación requiere de mayor riego y mayor profundidad de crecimiento; se recomienda el césped, arbustos grandes, árboles medianos y pequeños, entre otros. Para zonas con épocas cortas de lluvia, se recomienda la implementación de sistemas extensivos debido a su tolerancia a la sequía de su vegetación.

(Li y Young, 2014)

4. Drenaje.

Para este tipo de sistemas es importante contar con un sistema adecuado para la salida del agua recolectada. Para el diseño del drenaje, se deben tomar en cuenta algunas características de la cubierta

verde; tales como: el espesor, el tipo de vegetación, intensidad de lluvia, capacidad de retención y acumulación de agua, entre otros.

El porcentaje de evacuación dependerán del tipo de vegetación que se utilice. El porcentaje de evacuación es el que no puede ser retenido por la vegetación. A continuación:

- Para el tipo de naturación extensivo, el espesor mayor a 10 cm, necesitará un 30 % de desagüe y para un espesor menor a 10 cm, 50 % de desagüe.
- Para el tipo semi-intensivo, 40 % de desagüe.
- Para el tipo intensivo, 70 % de desagüe.

(Toj, 2016)

5. Tipos de composición de cubiertas verdes.

Existen distintas maneras de componer la vegetación sobre la estructura de las cubiertas verdes por medio de distintas técnicas y avances.

- **Multicapa monolíticos:** Consiste en la colocación de varias capas de componentes especializados con continuidad horizontal sobre techo impermeabilizado. Es de las tecnologías mayormente utilizadas a nivel mundial.
- **Multicapa elevados:** Las capas de componentes especializados se elevan del techo impermeabilizado por medio de pedestales; se deja un espacio vacío horizontal continuo en el intermedio.
- **Receptáculo:** Estos sistemas consisten en colocar recipientes individuales sobre el techo impermeabilizado, y en estos se promueve el crecimiento de vegetación. Pueden tener forma de bandejas, materas, cajones o sacos.
- **Monocapa:** Son sistemas compuestos por tapetes presembrados de una sola capa con diferentes componentes estables y activos, fijados al techo impermeabilizado.

- **Aeropónicos:** Para estos sistemas, a diferencia de los anteriores que el medio de crecimiento es a la vez un medio de nutrición y medio de soporte, este carece de sustrato o medio sólido de crecimiento y requiere que la nutrición se realice por irrigación directa de líquido a las raíces expuestas de las plantas.

(Escalante, 2011)

6. Operación y mantenimiento.

Se debe garantizar el funcionamiento correcto del sistema posterior a la instalación. Se extiende el tiempo de vida útil del sistema a través de distintas tareas de operación y mantenimiento para los elementos que conforman el sistema. Las tareas de mantenimiento dependen directamente del tipo de naturaleza de la cubierta. En sistemas extensivos el mantenimiento es mínimo, algunos requiriendo tan solo un riego y deshierbado al año. Para los sistemas intensivos, sí se requiere un mantenimiento regular como es el corte de césped, remoción de maleza, riego y fertilización. (Toj, 2016)

E. Depósitos de detención y/o infiltración

Normalmente utilizados debido a la reducción eficiente de los caudales picos al disminuir el impacto ambiental de la urbanización. Con respecto a la detención, se entiende a mantener la escurriencia recuperada por un período corto de tiempo para luego redirigirla hacia el sistema de alcantarillado, su reutilización o bien, al ciclo hidrológico por medio de infiltración natural.

(Butler & Davies, 2011)

Por lo general, los tanques de detención se construyen por medio de la metodología de construcción de concreto reforzado. Sin embargo, a partir de la década de los años 1980 se comienza a utilizar una alternativa de elementos celulares plásticos, o bien llamados "celdas geocelulares". Normalmente hechas con base en polipropileno con resistencia a las condiciones típicas de las aguas pluviales, a los esfuerzos verticales de carga y esfuerzos horizontales naturales del terreno; al ser una instalación subterránea.

(Parra, 2022)

Son tanques colocados a poca profundidad cuyo objetivo es almacenar e infiltrar gradualmente la escorrentía superficial. Se diseñan para transformar el flujo superficial en subterráneo y al mismo tiempo, a través de filtración, eliminar contaminantes (Abellán, 2014). Asimismo, son sistemas diseñados para ser ubicados en proyectos con tamaño reducido y al ser subterráneos, también permiten dar otros usos al suelo superior. Las celdas no precisan de uso de maquinaria pesada para su instalación, además que el proceso es fácil y rápido. Estas poseen capacidad de carga, por lo que pueden instalarse inclusive, debajo de vías de bajo tránsito, parqueos y áreas recreativas.

(De la Fuente, et al., 2021)

Los sistemas de atenuación o detención de celdas geocelulares se conforman por unidades modulares de plástico con una porosidad alta (aproximadamente del 95 %). Se utiliza normalmente con el objetivo de almacenar temporalmente la escorrentía superficial recuperada en un sistema debajo del nivel de suelo. La estructura de almacenaje, o bien el tanque, está conformado por un número de unidades individuales de celdas (usualmente varias hiladas), y un recubrimiento de algún geotextil o geomembrana.



Figura 5. Ejemplo de depósitos de infiltración.

Fuente: GRAF, S.L. (s.f.). Infiltración y drenaje. Graf - Sistemas de drenaje sostenible. Recuperado el 22 de abril de 2023, de <https://www.graf.info/es/suds-drenaje-sostenible/infiltracion-y-drenaje.html>

Existen diversos tipos de unidades de celdas que tienen diferentes características de carga y retención. Generalmente, se pueden clasificar en los siguientes términos según su tipo de estructura:

- Unidades moldeadas por inyección con columnas o soportes internos, fabricados completamente en fábrica.

- Unidades moldeadas por inyección con columnas o soportes internos, fabricados in situ.
- Sistemas de sustitución de la sub-base, se refiere a un tipo específico de unidad moldeada por inyección.
- Estructuras de placas abiertas, estructuras de caja fabricadas por medio del moldura por inyección individual de las placas que si se ensamblan entre varias, crean una caja.
- Estructuras abiertas de columnas, son hechas por columnas individuales y paneles que forman el suelo, techo y laterales del tanque.
- Estructuras de láminas perfiladas de plástico, estructuras de cajas conformadas por láminas individuales de plástico soldadas en conjunto.
- Estructuras en forma de panal.

(CIRIA, 2015)

La dirección del flujo que recorre las unidades puede variar, dependiendo de la estructura interna del sistema. En términos de desempeño hidráulico, las unidades pueden clasificarse en:

- Tridimensional, flujo libre: El agua ingresa a través de la tubería de entrada y sale en la tubería de salida, las cuales están conectadas a los costados de la estructura. Estos sistemas están diseñados para llenar verticalmente desde el nivel más bajo.
- Bidimensional, flujo horizontal: El agua ingresa por la tubería que esté ubicada en la parte inferior, media o superior del tanque. En un flujo crítico, el agua es forzada a salir por la tubería, a través de una capa de grava y hacia un tanque de almacenamiento.

(CIRIA, 2015)

Entre las ventajas que se encuentran en los sistemas de atenuación con elementos geocelulares, a comparación con los tanques de concreto, se destacan: menores costos en mano de obra, reducción de tiempo de instalación y/o construcción, reducción de desperdicio de material y proporciona la posibilidad de infiltrar el agua en el suelo; si las condiciones del suelo lo permiten. (Parra, 2022)

Internacionalmente y en Guatemala existen diversas compañías que ofrecen este tipo de productos. Para el análisis de este tipo de sistemas en este trabajo de investigación se utilizará el producto AquaCell NG de Amanco Wavin. Es una unidad geocelular utilizada para la construcción de tanques de atenuación, infiltración y almacenamiento de agua pluvial. Ofrece una relación de vacío del 95 % y cada celda almacena hasta 190 L. (Amanco Wavin, 2022)

Entre algunas ventajas de este sistema, que ofrece Amanco Wavin al mercado nacional, destacan su flexibilidad geométrica para conformar los tanques en diversas formas, reducción de tiempos de instalación a un rendimiento de 0.7 metros cúbicos por minuto por persona, su capacidad de carga resistente a condiciones de tráfico pesado de hasta 10 toneladas por llanta, sus materiales reciclados, instalación manual, entre otras. Amanco Wavin ofrece dos líneas de modelos de AquaCell NG; siendo la única diferencia el material. El tipo I utiliza polipropileno virgen que aumenta su capacidad de carga vertical y horizontal hasta 56 ton/m² y 7.7 ton/m² respectivamente. Por otro lado, el tipo II utiliza polipropileno virgen y polipropileno reciclado a una relación de 50-50, afectando su capacidad de carga vertical y horizontal a 17.5 ton/m² y 4.0 ton/m² respectivamente. (Amanco Wavin, 2022)

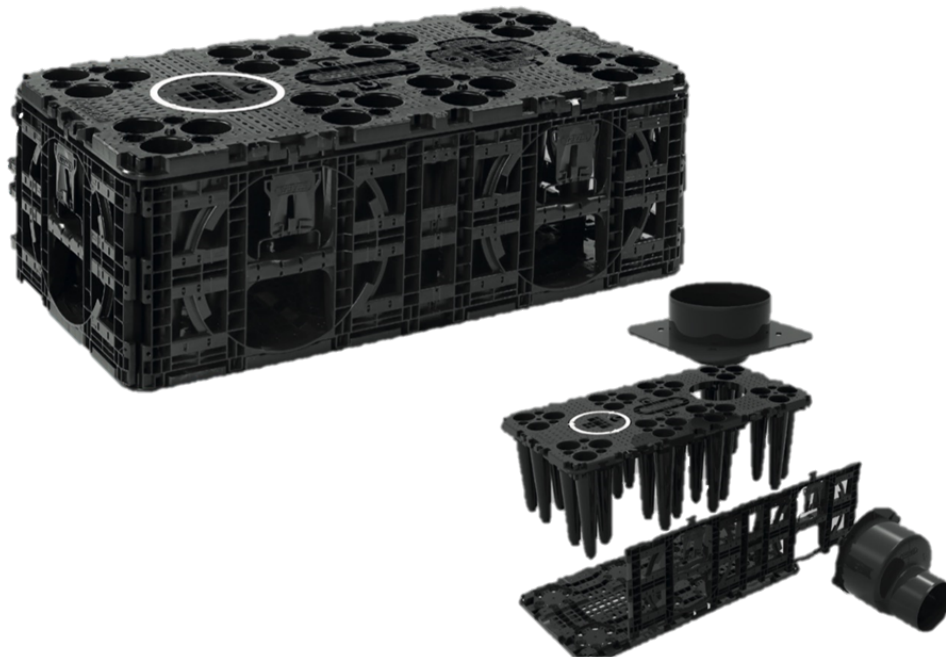


Figura 6. Tanque de celda geocelular AquaCell NG.

Fuente: Amanco Wavin. (2020). Product Datasheet AquaCell

Dimensiones	Longitud (mm)	1200	
	Ancho (mm)	600	
	Altura (mm)	400	
	Volumen bruto (L) [sin fondo]	306 [288]	
	Relación de vacíos (%)	94-96 %	
	Peso de la unidad principal (kg)	11	
	Conexiones de tubería (mm)	160-315	
Ventana de aplicación	Apilamiento	Estándar	Extra Fuerte
	Sin carga de tráfico (m)	0.30 - 4.40	0.3 - 8.00
	Carretera carga de tráfico ligero [1 ton por rueda] (m)	0.3 - 4.40	0.3 - 8.00
	Carretera carga de tráfico pesado [10 ton por rueda] (m)	0.80 - 4.30	0.55 - 7.95
Accesibilidad	Acceso vertical (mm)	ϕ250	
	Ancho canal de inspección (mm)	200	
	Superficie accesible (%)	54 %	
General	Material	PP reciclado	
	Color	Negro	
	Conectores	Integrado (sistema métrico)	
	Normativa	EN17152-1	

Cuadro 2
Información Técnica AquaCell NG.

Fuente: elaboración propia extraída de la Ficha técnica del Producto

1. Componentes.

Este sistema está conformado por distintos elementos con una función específica cada una:

- Entrada desde la red de drenaje: Esta es la conexión del sistema con la red de drenaje o bien, la conexión con otro SUDS si es que se combina con otras tecnologías de captación de agua.
- Dispositivo de tratamiento: Se trata de una fase de tratamiento del agua para la remoción de sólidos y aceites que puedan encontrarse en el flujo. Usualmente se utilizan separadores hidrodinámicos.
- Estructura de cajas reticulares de polipropileno: Las cajas reticulares son el componente fundamental del sistema. Es el componente que se forma al apilar y ensamblar un gran volumen

de almacenamiento.

- Dispositivo de control de conexión a la red: Este componente es el que controla hacia dónde se descarga el agua retenida, si es que se desea reutilizar o verter en el drenaje.
- Infiltración al terreno: El sistema está diseñado para reutilizar el agua o bien, permitir el proceso de infiltración de esta. Esta última fase del proceso es si se deja que el agua se infiltre por debajo de la base de las cajas reticulares y por el suelo. (De la Fuente, et al., 2021)

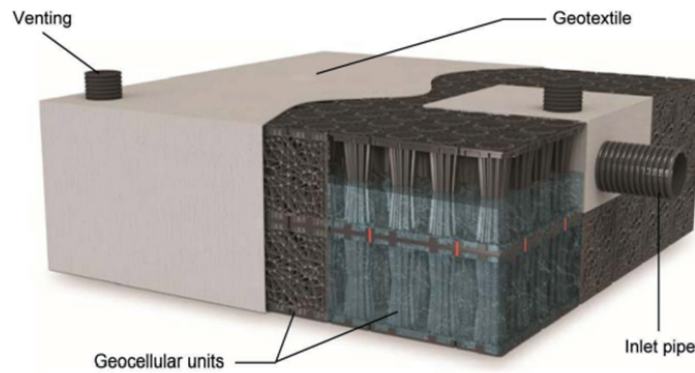


Figura 7. Ejemplo de sistema de infiltración.

Fuente: O'brien, A. S., Hsu, Y. S., Lile, C. R., & And, R. (2016). Structural and geotechnical design of modular geocellular drainage systems. Ciria.

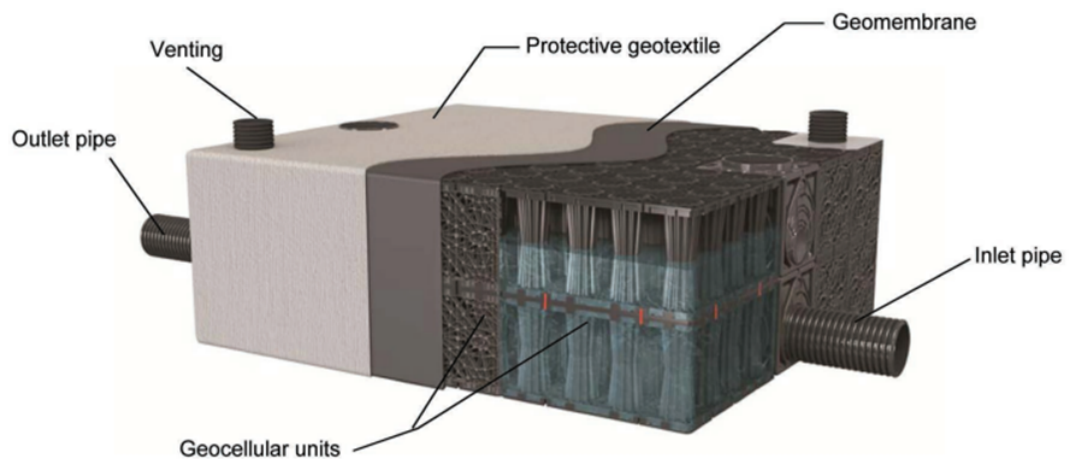


Figura 8. Ejemplo de sistema de atenuación.

Fuente: O'brien, A. S., Hsu, Y. S., Lile, C. R., & And, R. (2016). Structural and geotechnical design of modular geocellular drainage systems. Ciria.

2. Requisitos mínimos para la instalación de un depósito de infiltración.

- Evitar colmatación: Es esencial que este sistema se combine con otros SUDS para facilitar la sedimentación. Debe ser algún tipo de tecnología o sistema que permita la filtración de la escorrentía.
- Geometría: El diseño del sistema debe ser lo más simple posible para facilitar la instalación del geotextil y evitar que aumente el riesgo de entradas de tierra al depósito. La base dónde se instala el sistema debe ser plana, de manera que la escorrentía fluya de manera uniforme. También se debe considerar que la cama de gravas debe tener un espesor entre 0.10 y 0.20 m.
- Cajas reticulares: Dependiendo del fabricante, este debe tener alrededor del 90 % de índice de huecos. Se debe realizar un análisis estructural para asegurar que el sistema soporta las cargas a las que se someta. En el caso de tener un nivel freático muy superficial, se debe tomar en cuenta la flotación.
- Salidas: Se debe controlar la salida de agua y asegurar el vaciado del sistema alrededor de un período de tiempo de 48 horas a través de un ducto o infiltración. Si se vacía el sistema por medio de infiltración, el terreno debe contar con una permeabilidad de 10^{-6} m/s y el nivel freático debe estar, por lo menos, 1 m debajo de la base del sistema. (De la Fuente, et al., 2021)

3. Operación y mantenimiento.

El mantenimiento de un sistema de depósitos de infiltración se basa en la limpieza y supervisión de los depósitos, entrada y salida y otros elementos. En el caso de los depósitos, se debe realizar limpieza de sedimentos, hojas y otros sólidos que puedan perjudicar la zona de influencia del depósito; comprobar el vaciado en 48 horas; inspeccionar en busca de daños significativos y estructurales dentro y alrededor del depósito; inspeccionar el interior del depósito en busca de sedimentos y zonas colmatadas. En el caso de la entrada y salida, se debe realizar una inspección periódica de los pozos, elementos de rebose, dispositivos de pretratamiento y otros elementos que se encuentren en la entrada de agua. Se debe realizar una limpieza y retiro de sólidos o sedimentos. Por otro lado, se debe reemplazar el medio de filtración de la superficie de filtración, si este se encuentra colmatado.

(De la Fuente, et al., 2021)

F. Métodos de cálculo de tanques de detención y/o infiltración

Usualmente los métodos de cálculo de estos sistemas se basan en el cálculo de volumen del caudal tomando en cuenta las condiciones hidrológicas de la zona dónde se realizará la instalación. Se debe realizar un predimensionamiento, el cual trata de una aproximación inicial del volumen que debe ser ajustada posteriormente respecto a las condiciones geométricas del sistema de tanques a utilizar.

Se pueden encontrar diversas metodologías para predimensionar el volumen de almacenamiento de un tanque de detención. Entre algunas literaturas internacionales, se encuentra el método del *British Standard*, el cual indica o sugiere almacenar el volumen resultante del producto del área impermeable por la profundidad de lluvia supuesta de 12 mm (Watkins, 1991); en Dinamarca se sugiere 1 m³ por cada 30 m² del área impermeable (Watkins, 1991); en EE. UU., en Maryland, se sugiere calcular el volumen de almacenamiento a través del producto de 12.7 mm de escorrentía por el área analizada (Guo & Urbonas, 1996).

Las metodologías anteriores son válidas únicamente en los sitios dónde fueron desarrollados e implementados debido a que dependen de las condiciones hidrológicas del sitio. Por eso mismo, existen otras metodologías alternativas para el cálculo de predimensionamiento de estos tanques que utilizan variables hidrológicas. Entre ellas, se encuentra el método racional modificado, método del hidrograma triangular y el de la envolvente de lluvias.

Las cuales toman las siguientes suposiciones:

- La precipitación es homogénea en el área analizada.
- El área analizada no posee escorrentía superficial adicional aportada por otras áreas adyacentes.
- No se presentan pérdidas por infiltración o evaporación.
- La superficie del agua almacenada dentro de la estructura es horizontal.

(Parra, 2022)

G. Desarrollo urbano

1. Urbanización:

Es el proceso de la concentración de la población urbana, que se desarrolla por medio del crecimiento de localidades urbanas nuevas y existentes. Asimismo, es la evolución del estilo de vida de la población; las actividades, el diseño, la organización, entre otros.

(López, et al., 1989)

2. Desarrollo urbano en Guatemala:

a. Antecedentes:

Desde que se estableció la ciudad en el Valle de la Ermita entre 1774 y 1778, la Ciudad de Guatemala se ha visto en un constante crecimiento urbano que es conformado por el aumento de población urbana considerando en conjunto o por separado a la población rural. Se ha visto una mayor concentración de población en la zona urbana de la ciudad debido a la migración regional, cambios en los límites de la ciudad y el crecimiento natural.

b. Actualidad:

Guatemala es de los países menos urbanizados de América Latina. Sin embargo, alrededor del 52 % de la población reside en las áreas urbanas. Según datos del último censo realizado, el municipio de Guatemala cuenta con 923,392 habitantes, siendo todos categorizados en el área urbana. El departamento de Guatemala cuenta con 3,015,081 habitantes, en el cual el 91.24 % reside en el área urbana y el 8.76 % en el área rural.

c. Regulaciones:

El POT es la normativa básica de planificación y regulación urbana, el cual contiene normas técnicas, legales y administrativas establecidas por la Municipalidad de Guatemala. Su objetivo es establecer un desarrollo regulado y orientado en el territorio. (Municipalidad de Guatemala, s.f)

H. Sostenibilidad

1. Concepto:

El principio de la sostenibilidad es asumir que los recursos naturales no son una fuente inagotable de recursos, por lo que necesitan de un control y protección. Su definición trata a la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas. El desarrollo sostenible busca hallar un equilibrio entre el crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

(García, 2000)

2. Sostenibilidad en edificaciones:

Las edificaciones sostenibles son consideradas las construcciones diseñadas realizadas de manera que sus elementos, materiales y componentes hacen un uso eficiente de la energía y el recurso hídrico. Además, incorporan materiales reciclables y renovables que a la vez utilicen un diseño de bioarquitectura y técnicas de construcción que cumplan con cuatro distintos criterios: agua, suelo en la vivienda, materiales y energía. En el criterio del agua, se deben utilizar diseños y ecotecnologías para el uso y ahorro del recurso hídrico. Con respecto al suelo, se debe realizar un proceso de optimización del uso del terreno y armonización de la vivienda con el entorno natural. El criterio de energía se basa en el uso racional y utilización de fuentes de energía renovables como la eólica, solar y la biomasa. Al mismo tiempo, que el aprovechamiento de la iluminación natural y la inclusión de conceptos de bioclimática.

(Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

I. Hidrología

1. Concepto:

Se conoce a la hidrología como la ciencia que estudia la distribución espacial, temporal y las propiedades del agua presente en la atmósfera y corteza terrestre. Asimismo, se estudia la hidrología

en todas sus fases en las que se encuentra en su naturaleza (sólida, líquida o gaseosa). La hidrología se divide en superficial y subterránea, siendo la primera la que estudia las corrientes de agua que se encuentran la superficie de la tierra y su almacenamiento en depósitos naturales. En la subterránea, se incluyen los estudios de agua que se encuentra por debajo de la tropósfera.

(Guevara, 2004)

2. Modificación del ciclo natural del agua:

a. Ciclo natural del agua:

El ciclo hidrológico se basa en el constante movimiento del agua a través de todo el planeta por medio de su transferencia en sus distintos estados (líquido, gaseoso y sólido). Básicamente es la sucesión de etapas o procesos que hacen que el agua atraviese por el suelo, mar o aguas continentales y la atmósfera. Está controlado por la energía solar y la gravedad; el sol es factor fundamental en lograr el proceso de evaporación y la gravedad fomenta la precipitación, escorrentía e infiltración.

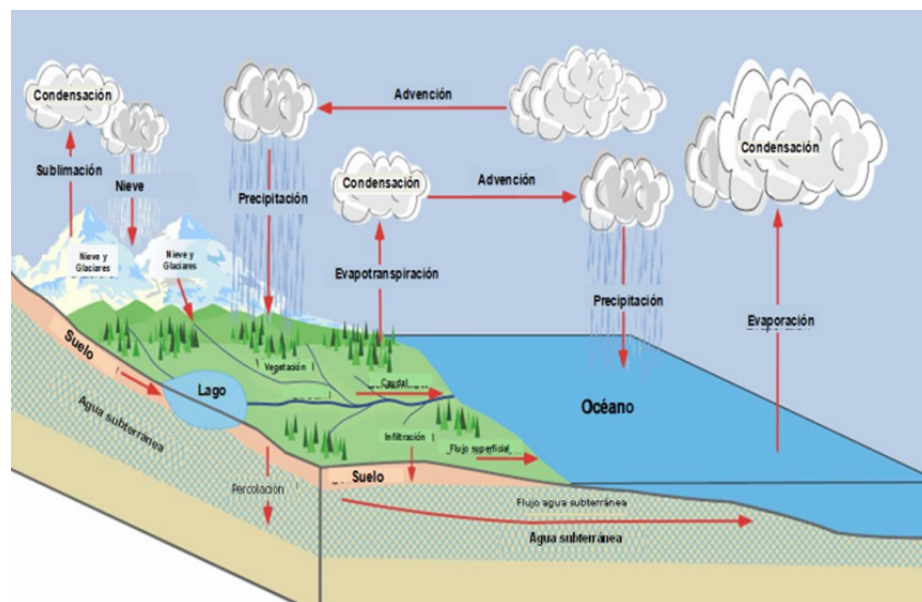


Figura 9. Ciclo hidrológico.

Fuente: Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica “Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico”. <https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-samfiles/publicaciones/varios/ciclohidrologico.pdf>

Se compone generalmente de los siguientes procesos:

- **Precipitación:** Es el agua meteórica que cae sobre la superficie de la Tierra en forma líquida o bien, sólida. Es provocada por cambios de temperatura o presión.
- **Evaporación:** Es el proceso en el cual el agua líquida cambia a un estado gaseoso. Esta requiere que la humedad de la atmósfera sea menor que la humedad de la superficie. Requiere de una gran cantidad de energía para realizar la transición entre estados del agua.
- **Condensación:** Es el cambio de estado del agua de gaseoso a líquido al enfriarse. Este proceso libera energía térmica hacia el medio ambiente.
- **Escorrentía superficial:** Es parte de la lluvia que no es infiltrada, interceptada o evaporada y fluye sobre la superficie terrestre.
- **Escorrentía subsuperficial:** Es parte de la lluvia que se infiltró en el manto terrestre y no alcanza el almacenamiento subterráneo y fluye por debajo de la superficie.
- **Infiltración:** Es el proceso del agua de lluvia que no fluye en la superficie, ni se evapora, sino que gracias a las condiciones del suelo logra infiltrarse entre este mismo hacia algún depósito acuífero o hacia el océano por medio del proceso de escorrentía subsuperficial.

(Ordoñez, 2011)

b. Ciclo urbano del agua:

Con el paso del tiempo, las actividades del ser humano han afectado directamente el ciclo hidrológico del planeta. Con la necesidad del consumo humano del agua, algunas de las etapas del ciclo hidrológico se han visto interrumpidas o afectadas. El involucramiento de las actividades del ser humano sobre el agua y el ciclo hidrológico se le conoce como el ciclo urbano del agua. Este indica las etapas que el ser humano necesita realizar para el consumo de agua potable y el uso del agua para uso doméstico o industrial. En lo mejor de los casos, se debe gestionar adecuadamente la captación del agua directamente del ciclo hidrológico y su vertido para que siga su curso natural. Este se puede dividir en tres fases: abastecimiento, saneamiento y reutilización. Cada fase se divide en distintas etapas; las etapas de la fase de abastecimiento son:

- Captación: Es el proceso de aducción del de agua provenientes de fuentes superficiales o subterráneas. Se debe regular este proceso y almacenar para su futuro uso.
- Potabilización: El agua captada es agua cruda y podría no contar con los parámetros permisibles para el consumo humano. Por ende, se debe de realizar un proceso de potabilización que consta de una serie de tratamientos que aseguren la calidad del agua y que sea apta para ser consumida por el humano.
- Distribución: El agua previamente potabilizada se debe almacenar en depósitos urbanos. Para hacer llegar el agua de un punto a otro se debe conducir por medio de tuberías primarias y secundarias hasta llegar a las acometidas del destino.

Las etapas de la fase de saneamiento son:

- Recolección o alcantarillado: Una vez se utilicen las aguas que pasaron por la fase de abastecimiento, se deben recoger; ya sea que provengan de uso doméstico, captada del agua pluvial, aguas negras, etc. Se captan y transportan por medio de alcantarillas y sistema de drenajes.
- Tratamiento o depuración: Esta etapa se basa en el uso de PTAR (Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales) que constan de procesos químicos, físicos y/o biológicos para restaurar la calidad inicial de las aguas residuales y minimizar el impacto al medioambiente.

Las etapas de la fase de reutilización son:

- Regeneración: Aparte del proceso de tratamiento, también se lleva a cabo un tratamiento complementario para restaurar las aguas a una calidad específica requerida para su uso posterior específico.
- Transporte: El agua regenerada debe ser transportada para ser entregada al usuario y se pueda reusar. El transporte, una vez más, se realiza por medio de sistemas de tuberías con un diseño distinto para lograr distinguirlas de las tuberías de aguas residuales.

(Díaz et al., 2021)



Figura 10. Ciclo urbano del agua.

Fuente: Díaz, J. B., Mólgora, C. C., Herrera, A. G., De Lourdes Rivera Huerta, M., Castrejón, S. P., Mendoza, I. V., Luna, C. S., Domínguez, A. M., & Soberanis, M. P. (2021). Cerrando el ciclo urbano del agua. *Perspectivas IMTA*, 2(15). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-15>

3. Escorrentía superficial.

a. Método racional modificado.

Este método es mayormente utilizado para calcular el hidrograma de la entrada y salida de un sistema de almacenamiento al utilizar los caudales pico calculados con el método racional. En primera instancia, se debe calcular el caudal producto de la escorrentía superficial antes del desarrollo por medio del método racional. El caudal pico Q_p generado por el cambio de uso del suelo, y con el caudal pico Q_A que se genera antes del desarrollo urbano. En algunas ocasiones se solicita que el Q_A , por las autoridades locales, que se considere como el máximo caudal del proyecto de urbanización hacia un cauce natural, o alcantarillado público.

(Parra, 2022)

La expresión para calcular el caudal pico por medio del método racional es:

$$Q = C * i * A \quad (1)$$

Siendo Q el caudal dado en metros cúbicos por segundo (m^3/s), la intensidad i en milímetros por hora (mm/h) y el área A en hectáreas (Ha), y el coeficiente de escorrentía C adimensional. Con el factor de conversión incluido en la fórmula se obtendría la siguiente expresión:

$$Q = \frac{CiA}{3600} \quad (2)$$

Para la obtención del caudal Q en litros por segundo (l/s), la intensidad i debe permanecer en milímetros por hora (mm/h) y el área A cambiar a metros cuadrados (m^2) y el coeficiente de escorrentía C se mantiene adimensional.

El método racional requiere hacer las siguientes suposiciones:

- La precipitación es homogénea en el área analizada.
- El coeficiente de escorrentía es homogéneo.
- No se presentan pérdidas por infiltración o evaporación.
- El tiempo de concentración de la cuenca, es igual o menor al tiempo de duración del evento de precipitación.

(Parra, 2022)

El coeficiente de escorrentía C representa la relación entre escorrentía y precipitación sobre un área de captación y su valor se encuentra en un rango entre 0 y 1. Este valor depende totalmente de las condiciones del suelo o de las características del área de captación; como la infiltración, condiciones de humedad del suelo, tipo de suelo, condiciones de cubierta terrestre y la pendiente del suelo. Un área de captación con una infiltración baja y/o pendientes altas va a tener un alto valor de C , mientras que un área de captación con alto contenido de vegetación va a obtener bajos valores de C .

Algunos valores de coeficientes para distintos tipos de uso de suelo y condiciones superficiales se presentan en la siguiente tabla:

Uso de suelo	C	Uso de suelo	C
Zonas urbanas Zonas de vecindario	0.70 - 0.95 0.50 - 0.70	Suelo arenoso; plano: 2 %	0.05 - 0.10
		Suelo arenoso; promedio: 2 % - 7 %	0.10 - 0.15
		Suelo arenoso; escarpado: 7 %	0.15 - 0.20
		Suelo arcilloso; plano: 2 %	0.13 - 0.17
		Suelo arcilloso; promedio: 2 % - 7 %	0.18 - 0.22
		Suelo arcilloso; escarpado: 7 %	0.25 - 0.35
Residenciales unifamiliares	0.30 - 0.50	Pastizales; suelos arcillosos Pastizales; suelos arenosos Zonas boscosas	0.15 - 0.45
Múltiples unidades residenciales; separadas	0.40 - 0.60		0.05 - 0.25
Múltiples unidades residenciales; unidas	0.60 - 0.75		0.05 - 0.25
Suburbano	0.25 - 0.40		
Zonas industriales ligeras	0.50 - 0.80	Calles de asfalto	0.70 - 0.95
Zonas industriales pesadas	0.60 - 0.90	Calles de concreto	0.80 - 0.95
		Calles adoquinadas	0.70 - 0.85
Parques y cementerios	0.10 - 0.25	Calles y aceras	0.75 - 0.85
Parques infantiles	0.20 - 0.35	Techos	0.75 - 0.95

Cuadro 3
Valores de coeficientes de escorrentía.

Fuente: K, Subramanya. (2013). Engineering Hydrology. McGraw Hill Education. 4th edition.

Por otro lado, la intensidad de la lluvia i depende directamente del área de estudio. Cada sitio previamente estudiado cuenta con una fórmula para calcular la intensidad máxima de precipitación que se adecúa a las condiciones climatológicas de la zona; duración y frecuencia de ocurrencia. Las relaciones entre duración y frecuencias se conocen como IDF por sus siglas en inglés *Intensity-Duration-Frequency*, que son desarrolladas utilizando información de la precipitación de un área específica. La fórmula mayormente utilizada es la de distribución de Gumbel, calculada por Ramababu *et al.*, (1979) para calcular intensidades de distintas áreas en India para diferentes duraciones y períodos de retorno; la expresión es la siguiente:

$$I_{D,T} = \frac{KT^x}{(D + a)^n} \quad (3)$$

Donde, T es el período de retorno en años, D es la duración de la precipitación en horas, I es la intensidad máxima de precipitación en un área en centímetros por hora (cm/h), y K , x , a , n son coeficientes por determinar. Estos últimos coeficientes deberían depender totalmente del área.

Para el desarrollo de este trabajo de análisis de implementación de SUDS en la Ciudad de Guate-

mala, se utilizará la información recolectada por el *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala* o mayormente conocido como INSIVUMEH por sus siglas. Cuenta con una red nacional de estaciones climáticas que recolectó la primera información sobre las intensidad de precipitación en el país en el 2002. Luego, en 2012, estudiantes de la Universidad de San Carlos de Guatemala actualizaron las curvas IDF ajustando los datos obtenidos de la discretización de bandas pluviográficas a funciones de distribución de probabilidad Normal y de Gumbel para presentar curvas IDF con modelos matemáticos estándar y el propuesto por Wenzel. (INSIVUMEH, 2018)

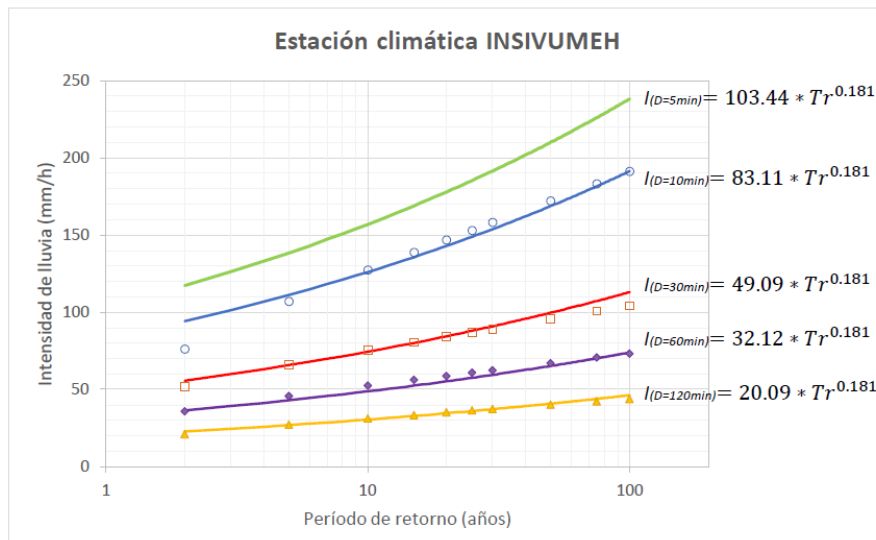


Figura 11. Curvas IDF típicas de la estación climática INSIVUMEH.

Fuente: INSIVUMEH. (2018). Curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la República de Guatemala

Las curvas IDF proporcionadas por el INSIVUMEH se basaron en el modelo propuesto por Sherman ajustando los datos de intensidades de precipitación asociados a distintas duraciones y frecuencias al siguiente modelo:

$$I_{D,T_r} = \frac{KT_r^m}{(D + B)^n} \tag{4}$$

Donde, T_r es el período de retorno en años, D es la duración de la precipitación en minutos, I es la intensidad máxima de precipitación en un área en milímetros por hora (mm/h), y K, m, B, n son

coeficientes por determinar. Estos últimos coeficientes deberían depender totalmente del área.

Para calcular la intensidad máxima de precipitación del área de la Ciudad de Guatemala, la estación de INSIVUMEH propone la siguiente expresión con siguientes coeficientes propias de la zona:

$$I = \frac{799T_r^{0.181}}{(D + 9.91)^{0.757}} \quad (5)$$

J. Contexto hídrico en Guatemala

1. Factores geofísicos del recurso hídrico.

La República de Guatemala se encuentra entre América del Norte y América del Sur, específicamente en América Central. Cuenta con un terreno montañoso posicionado geográficamente en una zona intertropical con un clima cálido y microclimas que dependen del relieve montañoso y la cercanía al mar.

(Arteaga, 1994)

Con respecto a su precipitación, cuenta con un promedio anual es de 2000 mm. La precipitación mínima se encuentra en las regiones secas del oriente y ronda aproximadamente entre los 700 mm. En la zona norte y occidente de la república, se logra encontrar una precipitación anual de hasta 5000 mm. La época de lluvia se encuentra entre junio y septiembre, siendo el período de menor precipitación entre julio y agosto.

(Arteaga, 1994)

Entre diversos recursos hídricos con los que cuenta el país, está el agua subterránea. Se calcula que el potencial de este recurso, aproximadamente, es un índice de infiltración de 33,699 millones de m³. El mayor rendimiento de infiltración se obtiene de los acuíferos aluviales de la costa pacífica y también en el altiplano (dónde representa una de las fuentes de abastecimiento más utilizada).

(Castañeda et al., 2000)

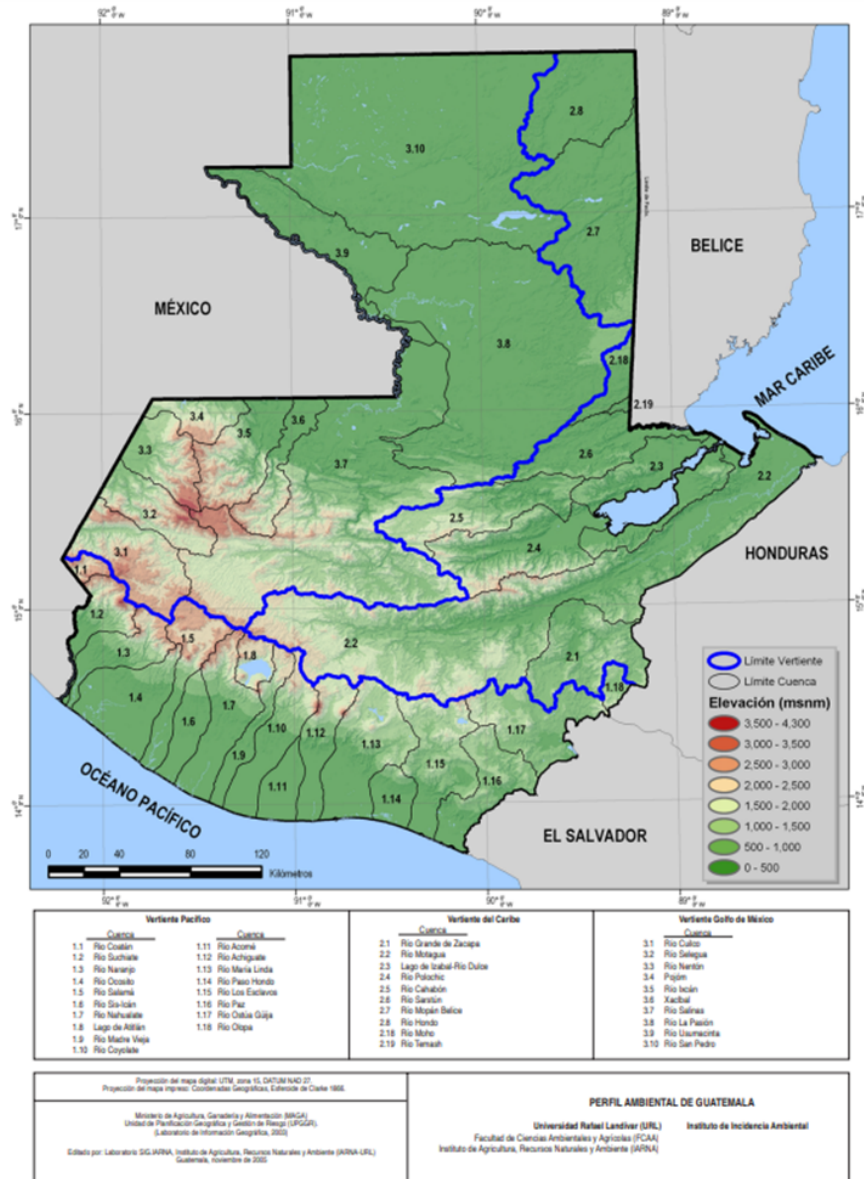


Figura 12. Cuencas hidrográficas de la República de Guatemala.

Fuente: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA). (2005). Situación del Recurso Hídrico en Guatemala. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas (FCAA). Universidad Rafael Landívar.

2. Disponibilidad de recursos hídricos.

Guatemala cuenta, en su totalidad, con un escurrimiento superficial que ronda entre los 1,760 y 3,190 m³/s, que se distribuye en 4 meses en las zonas más secas y con una distribución más uniforme en las regiones húmedas. Por otro lado, el 55 % del territorio nacional está conformado

por cuencas que repercuten a territorio internacional; 47.5 % de las aguas se dirigen hacia México, 7 % a El Salvador, 6 % hacia Belice y un 0.5 % hacia Honduras. Con respecto al agua subterránea, se estima un volumen de 33,699 millones de metros cúbicos anuales.

(IARNA, 2005)

Sin embargo, la información sobre la disponibilidad de recursos hídricos es limitada debido a la operación irregular de la red de estaciones meteorológicas manejadas por el INSIVUMEH y el INDE desde inicios de la década de los ochenta.

(Cobos, 1996)

3. Demanda hídrica.

Existe un incremento en la demanda de agua de las ciudades, generando problemas críticos de sobreexplotación. La Ciudad de Guatemala es el caso más severo con un déficit de 1 m³/s para el municipio de Guatemala y de 2-2.5 m³/s incluyendo municipios aledaños del área metropolitana. Los mantos acuíferos del valle de la Ciudad de Guatemala son los más explotados incrementando la profundidad de 1 a 2 metros anuales. Siendo producto de la alta urbanización de zonas de recarga y la falta de regulación de perforación de pozos. (IARNA, 2005)

4. Impactos.

Debido a la distribución de lluvias en el territorio nacional, hay meses con precipitación excesiva y otros con muy poca o nula. La regulación del escurrimiento superficial en el país es bastante limitada. La tala inmoderada de bosques, la eliminación de cobertura vegetal y la alta pavimentación de las zonas urbanas son factores que regulan la vegetación e incrementan las crecidas y reducen los caudales de estiaje al disminuir la infiltración. Asimismo, la deficiente operación de la mayoría de las municipalidades del país; la explotación inmoderada del agua subterránea; la falta de planificación y regulación del crecimiento urbano; la desinformación sobre la disponibilidad real del recurso; la falta de un registro de usuarios; y la temporalidad en la precipitación hacen que exista una escasez del recurso hídrico aunque parezca abundante.

(IARNA, 2005)

V. METODOLOGÍA

En el presente capítulo de este trabajo de graduación se presentan los métodos empleados para determinar el comportamiento de un sistema urbano de drenaje sostenible conformado por cubiertas verdes y un tanque de detención de módulos de polipropileno Aquacell NG de Amanco Wavin. Asimismo, se hace una descripción de la ubicación y los parámetros generales que se utilizaron para aplicar estos sistemas en territorio de la Ciudad de Guatemala.

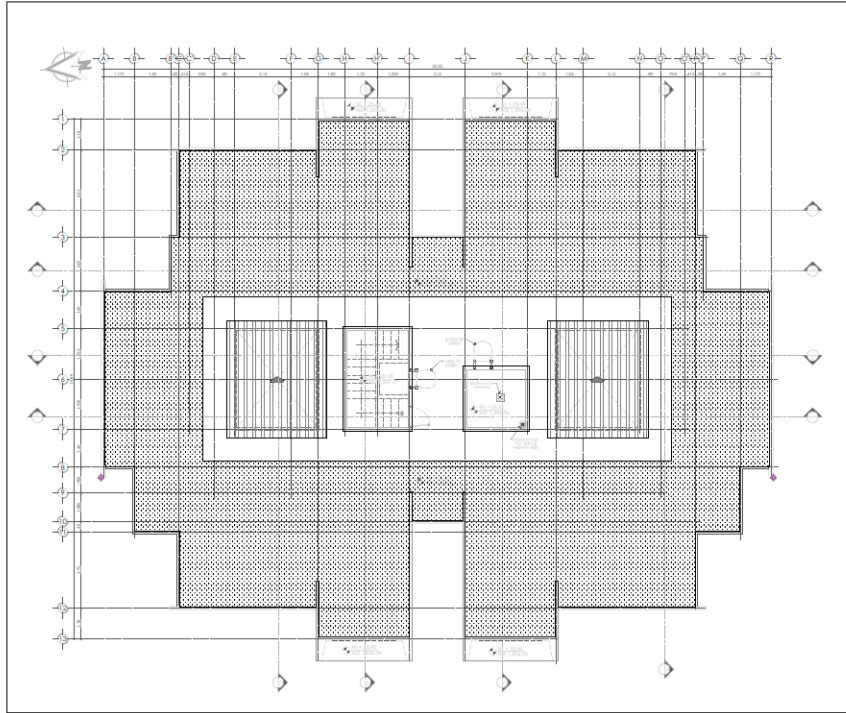
Por otro lado, se realiza una descripción del proceso de dimensionamiento de volumen de almacenamiento y de las características de los elementos que conformaron las cubiertas verdes y el tanque de almacenamiento. Se hace énfasis en la diferencia entre el uso de SUDS a comparación de los métodos convencionales que se acostumbra utilizar en Guatemala.

Finalmente, se definen los elementos necesarios para la instalación de un sistema compuesto por cubiertas verdes y tanques de almacenamiento para la retención de agua pluvial. Esto tomando en cuenta los recursos que se requieren para implementar ambos sistemas. La recopilación de todos los datos calculados y obtenidos serán analizados para concluir con este trabajo de investigación.

A. Ubicación

El edificio analizado se encuentra en el Cerro El Naranjo, en la Ciudad de Guatemala. Con azotea de un área de aproximadamente $342 m^2$, los cuales fueron utilizados para la ubicación de la cubierta verde analizada en este trabajo de graduación. Dentro de esta área se consideró un área mínima de corredor de acceso que deja un área destinada únicamente para la instalación de cubiertas verdes de $280 m^2$. El espacio mínimo de corredor de acceso para cubiertas verdes es de 24 pulgadas, aproximadamente 60 cm (Hoffman *et al.*, 2020); con base de comodidad ergonómica se decide dejar un corredor de 90 cm, lo que da el resultado de un área total de los $280 m^2$ ya previamente mencionados.

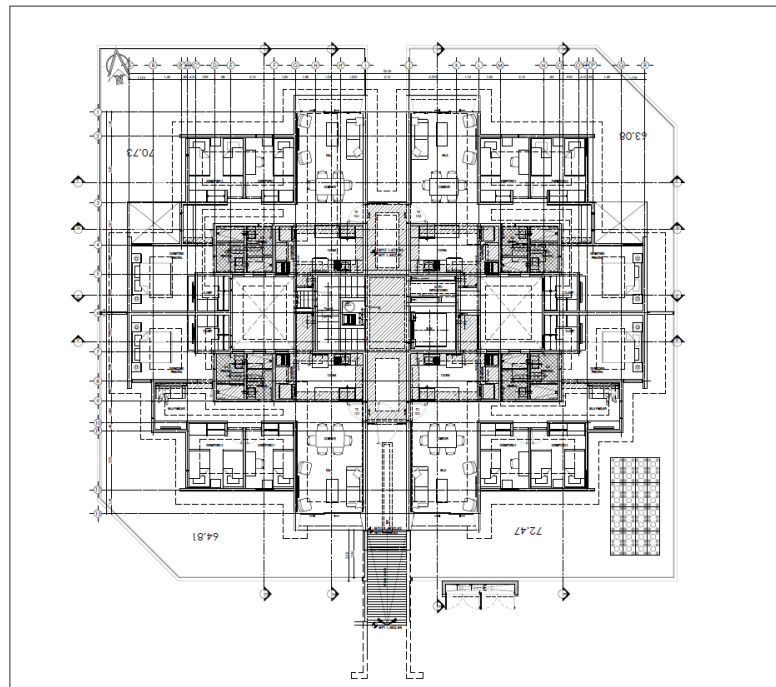
Respecto a la ubicación del tanque, se colocó lo más cercano posible a la torre de apartamentos con el objetivo de minimizar la longitud de tubería entre el tanque y la cubierta. Se tomó en cuenta el muro de cerramiento existente del edificio. Con el área de $218 m^2$ de la cubierta verde, se necesitan un poco más de 30 celdas de Aquacell NG, una cama del tanque se puede modular perfectamente en el área frontal de la torre. Sin embargo, para tener una forma uniforme de las geoceldas modulares se utilizarán 32 celdas para tener dos camas de celdas y un área de planta de $11.52 m^2$.



PLANTA DE TECHOS
TORRE 1

ESCALA 1:50

Figura 13. Planta de techos de edificación



PLANTA
TORRE 1, NIVEL 1

ESCALA 1:50

Figura 14. Planta de nivel 1. Ubicación en planta de tanque de detención.

B. Flujo de agua pluvial en la edificación

Para poder proceder con el predimensionamiento de los elementos analizados en este trabajo de graduación, se necesita realizar un diagrama del flujo del agua pluvial de la edificación en cuestión. El sistema de captación en este caso se da por medio del sistema de la cubierta verde que por medio de canales y sistemas de tuberías conducen a un sistema de filtración. Este sistema se ocupa de eliminar contaminantes o impurezas en el agua recuperada para que esta pueda ser posteriormente utilizada. El sistema de almacenamiento se trata de un tanque de detención de módulos geocelulares que almacena el agua para ocuparla posteriormente. Finalmente, luego de ser utilizada el agua pluvial, esta se procede a conducir al sistema de alcantarillado público o privado.

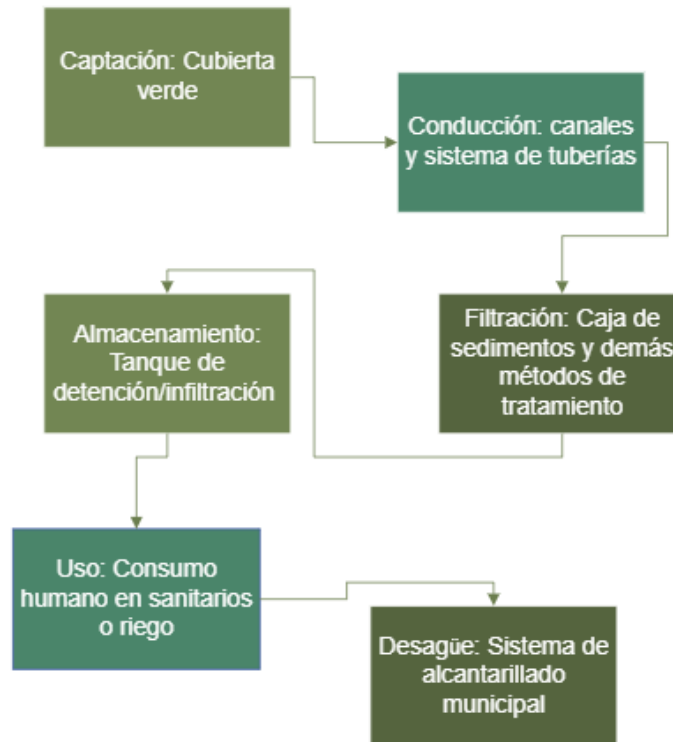


Figura 15. Diagrama de flujo de agua pluvial

C. Diseño de cubierta verde

Conociendo que una de las limitantes para la selección de vegetación es la carga gravitacional que podría inducir sobre la losa, entonces se escoge realizar un diseño de cubierta verde de tipo extensiva

ya que se desconoce el diseño estructural de la losa existente y las cargas con las cuales fue diseñada; la cubierta verde de tipo extensiva es la configuración más ligera con una carga permanente entre 110-140 kg/m² en estado saturado (Toj, 2016).

Con respecto a la primera capa, la vegetación de una cubierta verde localizada en la Ciudad de Guatemala depende de las condiciones climáticas de la zona. Guatemala posee dos épocas, la lluviosa y seca (Funcagua, 2020); la época lluviosa suele ocurrir de mayo a octubre y la seca, de noviembre a abril. El sistema extensivo de cubiertas verdes es el tipo más económico y con menor mantenimiento en cuestión de riego (Toj, 2016). El tipo extensivo suele componerse por las plantas de género *sedum*, crasuláceas y suculentas (Toj, 2016). Entre las especies de plantas propuestas en este trabajo de graduación para conformar el diseño de cubierta se encuentran las siguientes:

1. *Sedum Japonicum*.

Esta planta ornamental, también conocida como Sedum Oro tiene un parecido al musgo. Es un tipo de suculenta que necesita un riego bajo o normal y es de semisombra a pleno sol. Tiene una resistencia a la sequía y poca tolerancia a la humedad, pero destaca por su rápido drenaje (Camacho, 2023).



Figura 16. *Sedum Japonicum*.

Fuente: iNaturalist Guatemala. (s.f.). *Sedum japonicum*. <https://guatemala.inaturalist.org/observations/49253625>

2. *Sansevieria Trifasciata*.

Esta especie de planta no es exigente respecto a la luz. Puede ser de sombra, pero no tiene problemas si obtiene luz directa. Respecto al riego de esta especie, logra tolerar bien la sequía (Acosta, 2022).



Figura 17. *Sansevieria trifasciata*.

Fuente: Snake Plant (*Sansevieria trifasciata*). (s.f.). iNaturalist. <https://www.inaturalist.org/taxa/67710-Sansevieria-trifasciata>

3. *Echeveria Elegans*.

Esta especie, perteneciente de la familia *Crassulaceae*, es una planta ornamental bastante utilizada en Guatemala. Es bastante resistente a las condiciones de sequía. Respecto a la luz, es ideal que esté en un lugar iluminado o con horas de luz directas (Acosta, 2022).



Figura 18. *Echeveria Elegans*.

Fuente: iNaturalist Guatemala. (n.d.-b). Mexican Snowball (*Echeveria elegans*). <https://guatemala.inaturalist.org/observations/26354387>

4. Echeveria Pulvinata.

Esta especie de suculenta, al igual que las demás plantas propuestas, requiere de exposición solar completa y un bajo riego. Es una especie que puede adaptarse a altas temperaturas, lo que la hace bastante resistente a la sequía y a la luz solar directa. Esta también requiere de un suelo que tenga la característica de ser un buen drenante (Osorio, 2023).



Figura 19. Echeveria Pulvinata.

Fuente: iNaturalist Ecuador. (s.f.). Conchita (variedad Echeveria pulvinata leucotricha). <https://ecuador.inaturalist.org/observations/37490858>

5. Kalanchoe Tomentosa.

Esta especie requiere de un balance de luz directa, indirecta y sombra. Sin embargo resiste muy bien la luz directa. Respecto al riego, esta resiste muy bien a la sequía; en épocas de invierno, no es necesario regarla (Goins, 2022).



Figura 20. Kalanchoe Tomentosa.

Fuente: Kalanchoe tomentosa. (s.f.). iNaturalist Ecuador. <https://ecuador.inaturalist.org/taxa/335091-Kalanchoe-tomentosa>

6. Echeveria Lilacina.

Esta especie es parte de la familia de las crasuláceas. Pueden ser de semisombra, o bien, de luz directa. En cuanto al riego, estas requieren un riego normal o mínimo. Esta logra retener bastante el agua, pero depende también del sustrato; soporta muy bien la sequía. (Camacho, 2022)



Figura 21. Echeveria Lilacina.

Fuente: iNaturalist Guatemala. (s.f.). Ghost Echeveria (Echeveria lilacina).
<https://guatemala.inaturalist.org/observations/4191224>

Respecto a los componentes del sustrato que se debe utilizar, no hay gran diferencia entre los que se debe utilizar entre cada tipo distinto de cubierta verde. Usualmente, el sustrato es una mezcla de minerales naturales y artificiales, materiales reciclados o de desecho y materia orgánica. Entre los minerales naturales que se suelen utilizar está la arena, arcilla, escoria volcánica, piedras pómez y grava (Ampim *et al.*, 2010).

Los componentes sí dependen totalmente del tipo de cubierta verde, la vegetación, las condiciones climáticas y otros factores como la disponibilidad y accesibilidad. La condición ideal de un sustrato de cubierta verde debe ser estable, ligero, mantener nutrientes y drenar correctamente el agua. Se recomienda una composición basada en 80-100 % minerales y 0-20 % de material orgánico con fertilizante. Para cubiertas verdes extensivas, no se recomienda un 30 % de arena (Ampim *et al.*, 2010). Por lo que la composición propuesta de sustrato para esta cubierta verde se basa en 20 % de arena (se reduce porcentaje por temas de peso), 30 % de escoria volcánica y piedra pómez, 20 % de grava, 30 % tierra negra y fibra de coco. Siendo distribuido en una capa que ronde de espesor entre

los 10 y 15 cm (Toj, 2016).

Con respecto a la capa de filtro, esta usualmente se compone de algún producto geotextil o "geofoam", que es un producto de poliestireno expandido. Entre los geotextiles y el material de poliestireno expandido, usualmente el segundo material suele comportarse bajo una permeabilidad más regular que los geotextiles; la permeabilidad en la capa filtrante debe estar balanceada para obtener una retención y drenaje controlados (Carrera *et al.*, 2022). Según el ASTM D4751, el espesor puede variar entre 0.06 mm y 0.2 mm (Hoffman *et al.*, 2020).

Para la capa de drenaje e impermeabilización se pueden utilizar distintas tecnologías disponibles en el mercado. La capa de impermeabilización tiene el objetivo de resguardar la estructura soportante de cualquier contacto con agua por la parte de adentro. Por otro lado, la capa de drenaje tiene como función la canalización del agua retenida hacia un mismo punto de drenaje para el traslado del agua recolectada. Para las cubiertas verdes extensivas el sistema de acumulación debe tener de 60 a 200 mm (Toj, 2016). Se recomienda utilizar tecnologías de capas plásticas perfiladas, como la Drainroof H6 de Geoplast, que posee un espesor de 6cm con una reserva de agua de 12 l/m^2 , un volumen de desagüe de 40 l/m^2 y una superficie de drenaje $318 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (Geoplast, 2018).

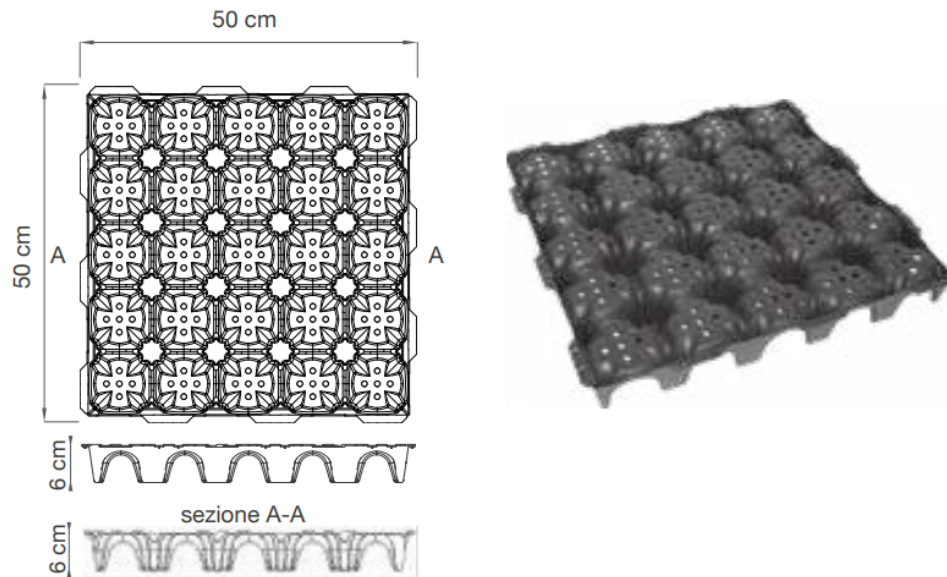


Figura 22. Drainroof H6 Geoplast.

Fuente: Geoplast. (2018). Drainroof Manual Técnico - Sistema a alto rendimiento para techos verdes.

D. Dimensionamiento de un tanque de detención/infiltración

Con respecto a la determinación del volumen del tanque de detención, se basó en el procedimiento del método racional modificado, utilizando la curva IDF de la estación INSIVUMEH que se localiza y toma información de la Ciudad de Guatemala, que es el lugar de análisis para realizar la instalación de dicho tanque.

El método racional modificado se utiliza para el cálculo del gasto máximo en cuencas pequeñas, siendo el gasto máximo el producto del área de drenaje, la intensidad de lluvia y el coeficiente de escorrentía de la superficie. Aproximadamente es válido utilizarlo para áreas de cuencas menores a 2.5 km^2 . No solo logra calcular caudales máximos, sino que también logra desarrollar hidrogramas, de forma trapezoidales, para el diseño de tanques de almacenamiento (Rios et al., 2018); este asume que el tiempo de concentración hasta llegar a su caudal pico es el mismo tiempo que se toma el caudal en decrecer hasta su inicio.

Este método depende totalmente de las características climáticas del lugar de origen de la instalación del sistema. Según lo recomendado por la "Guía de requisitos para la evaluación de proyectos de agua y alcantarillado de la Ciudad de Guatemala" de la Empresa Municipal de Agua de la Ciudad de Guatemala (EMPAGUA) es permitido un mínimo de 150 mm/h como valor de intensidad de lluvia y un tiempo de concentración mínimo de 10 min.

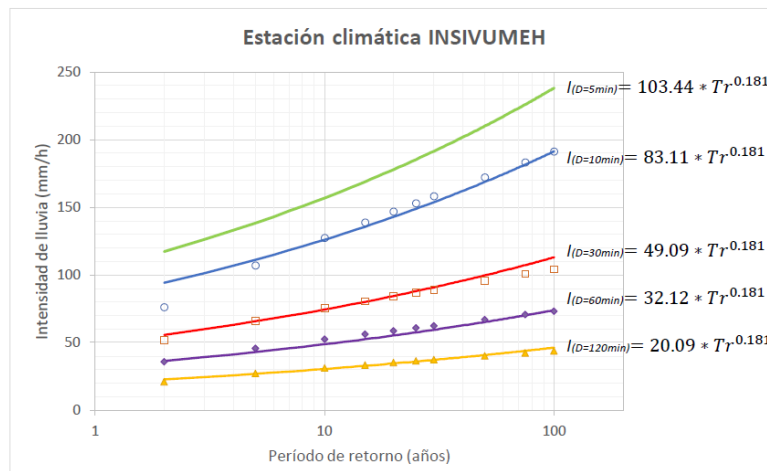


Figura 23. Curvas IDF típicas de la estación climática INSIVUMEH.

Fuente: INSIVUMEH. (2018). Curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la República de Guatemala

La curva de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) que se utilizó para calcular el volumen de detención pertenece a la estación climatológica INSIVUMEH que se encuentra en la cuenca María Linda dentro del territorio de la Ciudad de Guatemala y que posee información de 1990-2010. La estación propone la expresión (5) con sus propios coeficientes propias de la zona.

La fórmula de método racional modificado para construir un hidrograma trapezoidal ajustado a las condiciones climatológicas del sitio se toma en cuenta como la siguiente expresión:

$$Q_p = C_p * \left(\frac{c * T_r^m}{T_d^e + f} \right) * A \quad (6)$$

Donde Q_p es el caudal pico (l/s); C_p es el coeficiente adimensional de escorrentía después del desarrollo; A es el área en m^2 ; y el contenido dentro del paréntesis es la fórmula de intensidad en mm/h para el período T_r en años y T_d la duración en minutos de la tormenta; c , m , e y f son coeficientes dependientes del sitios y de la curva IDF.

Para hallar el volumen de almacenamiento se debe restar el volumen de ingreso (luego del desarrollo) menos el volumen de salida (antes del desarrollo):

$$V_s = V_i - V_0 \quad (7)$$

Donde todos los volúmenes se expresan en litros.

Para hallar el volumen de ingreso se puede hallar por medio del área bajo el hidrograma trapezoidal que se representa con la siguiente expresión:

$$V_i = 60 * (0.5) * Q_p * ((T_d - T_c) + (T_d + T_c)) \quad (8)$$

Donde V_i es el volumen precipitado durante la tormenta en litros, Q_p es el caudal pico en l/s, T_d es el tiempo de duración de la tormenta en minutos y t_c es el tiempo de concentración después del desarrollo en minutos.

Para hallar el volumen de salida se debe hallar el área triangular del hidrograma de salida por medio de la siguiente expresión:

$$V_0 = 60 * (0.5) * Q_A * (T_d + T_c) \quad (9)$$

Donde V_0 es el volumen de salida en litros, Q_A es el caudal máximo permitido en l/s , T_d es el tiempo de duración de la tormenta en minutos y t_c es el tiempo de concentración después del desarrollo en minutos.

Reemplazando (8) y (9) en la (7), se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_s = 60 * Q_p * T_d - 30 * Q_A * (T_d + T_c) \quad (10)$$

Para obtener el tiempo de duración T_d que proporciona el máximo volumen de almacenaje para el período de retorno previamente seleccionado, se debe derivar la ecuación (10) respecto al tiempo de duración T_d y luego reemplazar la ecuación (2) y la ecuación que conforma la intensidad de la ecuación (4) para obtener la siguiente expresión:

$$F(T_d) = \frac{60 * T_d * C_p * A}{3600} * -K * T_r^m * n * (T_d + B)^{-n-1} + 60 * C_p * \frac{A}{3600} * \frac{K * T_r^m}{(T_d + B)^n} - 30 * Q_A \quad (11)$$

Igualando a cero la ecuación (11) y utilizando PTC Mathcad Prime para despejar T_d y hallar el valor máximo de tiempo de duración para obtener el volumen de almacenamiento.

Para un área de recolección de 280 m^2 se calculó un volumen máximo de almacenamiento de 8.22 m^3 para un período de retorno de 30 años, obtenido por medio del método racional modificado. Tomando en cuenta a las dimensiones de las celdas geocelulares Aquacell NG utilizadas para este trabajo, se necesitarían aproximadamente 29 celdas, pero para tener una uniformidad en la geometría de las celdas modulares se realizó de 32 celdas.

Para realizar una comparación entre un tanque de agua pluvial y un tanque de abastecimiento por medio del dimensionamiento del tanque por el consumo consumo de agua de la población del edificio, se calculó la cantidad de habitaciones del edificio; cuenta con 9 niveles de 4 apartamento en cada nivel y 3 habitaciones cada apartamento. La dotación de EMPAGUA para un apartamento

de 3 habitaciones.

Según Infom-Unepar, para poblaciones menores a 1000 habitantes, en este caso serían 144 habitantes, se debe utilizar un factor de día máximo entre 1.2 y 1.5; se utilizó el máximo para obtener un caudal pico. Por lo que el caudal de diseño se obtiene por medio de la multiplicación del caudal medio por el factor ya mencionado.

El factor de volumen de tanque, según Infom-Unepar para el cálculo del volumen de un tanque de almacenamiento, se utiliza un 40 % como factor, por lo que con la siguiente expresión se obtiene el resultado comparativo:

$$V = \left(\frac{FV * Qm * 86400}{1000} \right) \quad (12)$$

Donde se obtiene el volumen en m^3 , el Factor de volumen se expresa en porcentaje, el Qm es el caudal de diseño en l/s .

Ya con esa expresión se obtiene un resultado de $25.92 m^3$, eso dividido el 95 % de $0.288 m^3$, que es el volumen unitario de una celda real, se obtiene un número de celdas cercano a 95.

E. Dimensionamiento de tubería

Como conexión entre el punto de recolección del agua pluvial, siendo la cubierta verde, y el tanque de detención modular se necesitó dimensionar de la tubería por medio del método de pérdida de carga a través de la fórmula de Hazen-Williams. Al tener la altura del edificio y el nivel del tanque de detención se logró obtener la pérdida de carga y proponer la presión de la tubería pvc necesaria para realizar la conexión. A continuación la fórmula de pérdida de carga de Hazen-Williams:

$$h_f = \frac{1743.811 * L * Q^{1.852}}{C^{1.852} * \phi^{4.871}} \quad (13)$$

Donde h_f es la pérdida de carga en metros (m); L es la longitud horizontal entre el punto de entrada y salida de la tubería analizada en metros (m); Q es el caudal que recorre la tubería en litros por segundo (L/s); C es el coeficiente adimensional de Hazen-Williams que varía según el material de la tubería; ϕ es el diámetro en pulgadas (*pulg*).

Despejada para obtener el diámetro sería:

$$\phi = \left(\frac{1743.811 * L * Q^{1.852}}{C^{1.852} * h_f} \right)^{\frac{1}{4.871}} \quad (14)$$

El edificio analizado posee 9 niveles, siendo la terraza la décima losa. El tanque se desea ubicar a un metro debajo del nivel de suelo del patio frontal, la altura entre la terraza y el nivel más bajo del tanque es de aproximadamente 23.83 m; siendo este nuestro valor de h_f . Utilizando el caudal antes del desarrollo de 4.8 L/s , se obtiene un diámetro menor al mínimo que es de 3 pulgadas según la Figura No. 17. Por lo que se recomienda utilizar una tubería de 125 psi de 3 pulgadas para el sistema de bajada de agua entre los techos verdes y el tanque de detención.

PRESION	DIÁMETRO COMERCIAL (PULG)
125 psi = 87.88 m.c.a	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 18
160 psi = 112.49 m.c.a	1, 1¼, 1½, 2, 2½, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15
250 psi = 175.77 m.c.a	¾, 1, 1¼, 1½, 2, 2½, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12

Figura 24. Diámetros comerciales de tuberías PVC.

Fuente: Aguilar, P. (2007). Apuntes sobre el curso de Ingeniería Sanitaria 1. USAC.

Por otro lado, la tubería de descarga del tanque se encuentra en la parte inferior y se puede calcular como un orificio sumergido debido a que la vena líquida que sale por el orificio queda por

debajo del nivel del líquido que ingresa al tanque (Fernández, 2000). Siendo la ecuación utilizada para encontrar el caudal de descarga la siguiente:

$$Q = C_d * A * \sqrt{2 * g * h} \quad (15)$$

Donde Q , que es el caudal antes del desarrollo, está en m^3/s ; A es el área de orificio en metros cuadrados m^2 ; g es la gravedad; h es la altura del nivel de agua a la del orificio en metros m y C_d es el coeficiente de descarga que depende de la forma de la salida del agua.

La fórmula despejada para obtener el diámetro en metros m , sería:

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * C_d * \sqrt{2 * g * h}}} \quad (16)$$

Con la cual se obtendría un diámetro de 2.031 pulgadas como mínimo. Debido a dicho valor se recomienda utilizar el siguiente diámetro comercial más grande que sería de $2\frac{1}{2}$ pulgadas.

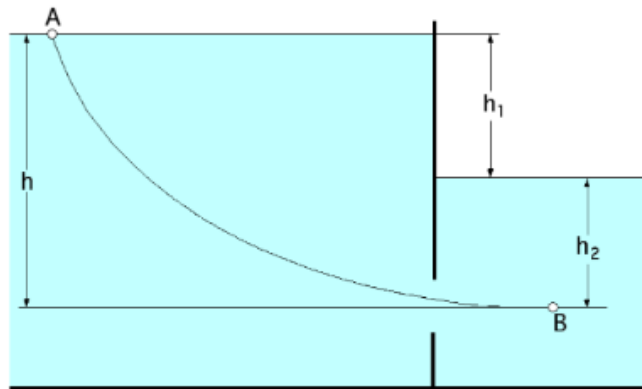


Figura 25. Orificio sumergido.

Fuente: Fernández, P. (2000). Mecánica de Fluidos. Universidad de Cantabria

VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la elaboración de este trabajo de investigación sobre la evaluación del funcionamiento e impacto de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, se utilizó una edificación localizada en el Condado Naranjo en la Ciudad de Guatemala para tomar en cuenta las condiciones propias de la zona y el edificio como parámetros iniciales para el dimensionamiento y diseño de un tanque de detención (infiltración) y, una cubierta verde.

Para la instalación de un sistema urbano de drenaje sostenible conformado por una cubierta verde y un depósito de detención o infiltración se necesita realizar un estudio climatológico avanzado de la zona; es necesario tanto para el cálculo del dimensionamiento como para la selección de vegetación y sustrato. En el caso de la Ciudad de Guatemala, que es una zona de clima tropical con 4 meses de época seca se necesitó tomar en cuenta una vegetación que resistiera época de sequía y al mismo tiempo, ahorrara costos en temas de mantenimiento. Esto va de la mano con el tipo de cubierta verde que se decidió utilizar, que son los tipos extensivos; una opción más económica que se asimila más a la realidad de presupuesto y cultura de inversión sobre este tipo de tecnologías ambientalmente sostenibles en Guatemala.

Por otro lado, más cercano al lado del proceso de instalación de un tanque de detención y/o infiltración, se debe tomar en cuenta realizar un estudio de suelos para conocer las condiciones del terreno dónde se colocará este sistema para conocer los niveles de compactación que se debe realizar para preparar la zanja dónde se colocarán los tanques. En el caso de ya sea un tanque de detención o infiltración, es necesario colocar una geomembrana para separar o no el tanque del suelo. En el caso de este trabajo de investigación, el tanque de detención se calculó para almacenar agua pluvial por lo que se debe colocar dicho material para evitar pérdidas de agua. Asimismo, al ser tanques de detención de celdas modulares, es necesario conocer la geometría del suelo para poder modular adecuadamente el tanque. En este caso, al carecer de un estudio de suelo y topografía, se debió asumir que el terreno era plano y regular. Por último, se debe conocer bien las especificaciones del producto; en este caso más que todo es importante las capacidades del material para soportar el peso del suelo que posee encima, las dimensiones y el porcentaje de retención.

En el caso de la cubierta verde, es necesario comenzar con analizar la estructura dónde se colocará el sistema; si es una edificación nueva sería necesario calcular y diseñar la losa tomando en cuenta las cargas de la cubierta y si es existente la edificación, se debe analizar el detalle del armado y

construcción de la losa. Asimismo, se debe aplicar algún método de impermeabilización para no afectar el estado de la losa debido al agua que contendrá la cubierta. En el caso de una cubierta verde extensiva, no se utilizan plantas con grandes raíces por lo que no es recomendable añadir costos por membranas de protección por raíces.

Con respecto al dimensionamiento del tanque de detención, este se calculó por dos métodos distintos. El método racional modificado se basó en las condiciones climatológicas de la zona, dimensionando el tanque únicamente tomando en cuenta el agua recolectada por la cubierta verde. Por otro lado, el dimensionamiento del tanque de detención tomando en cuenta únicamente el consumo de los habitantes fue mayor. Con el primer método se obtuvo un volumen de diseño de 8.22 m^3 y con el segundo, 25.92 m^3 . Esto da un resultado real y acertado, debido a que el abastecimiento de agua pluvial es intermitente y depende totalmente de la época climática, por lo que dará un resultado menor. Cualquiera de los dimensionamientos es funcional dependiendo del objetivo del uso del agua. Ya que el dimensionamiento por medio del método racional modificado satisfará únicamente el 31.71 % de la necesidad de consumo hídrico del edificio. Asimismo, se obtuvo un dimensionamiento de diámetro de tubería de conexión entre sistemas de 3 pulgadas y un diámetro para la tubería de descarga del tanque de 2 pulgadas y media.

En el caso de este trabajo de investigación, se investigó únicamente el suministro de un tanque de almacenamiento que según proveedores locales, el precio de m^3 varía entre 450-500 dólares para tanques menores a 10 m^3 ; el precio del m^3 puede ir disminuyendo según el aumento de tamaño del tanque. Con respecto a las cubiertas verdes, se tiene un estimado que el costo de un m^2 de una cubierta extensiva ronda entre los 185-200 dólares (Porsche, 2003). Con respecto a la inversión económica del suministro del tanque de almacenamiento, utilizando el volumen más alto (25.92 m^3), daría un costo de aproximadamente Q100,000. Por otro lado, el suministro de los techos verdes daría un costo de aproximadamente Q450,000.

Con un promedio de lluvia de 71.68 mm mensuales de precipitación, en un área de 280 m^2 , mensualmente se obtendría una acumulación de 20 m^3 de agua pluvial; sin tomar en cuenta pérdidas por factores como longitud de tubería, evaporación, irregularidad de lluvia, etc. Con el tarifario de EMPAGUA de 2020 de Q3.95 el consumo de 21-40 m^3 y la dotación según EMPAGUA de un apartamento para 3 habitaciones de 1200 l/día ($36 \text{ m}^3/\text{mes}$ aproximadamente), cada apartamento en un mes haría un gasto de Q142.2 aproximadamente. Tomando en cuenta la recolección de 20 m^3

de agua pluvial para el edificio completo; $0.56 \text{ m}^3/\text{apartamento}/\text{mes}$. Se lograría realizar un ahorro del 1.55 %.

El objetivo de la instalación de una cubierta verde y un tanque de detención/infiltración podría ser principalmente por beneficios estéticos, ambientales o bien, sociales. Estos productos son tecnologías que favorecerían más a proyectos, que normalmente la Municipalidad de Guatemala solicita, que tienen como objetivo mitigar el impacto ambiental o social de un proyecto principal. O bien, podrían funcionar en zonas que sufren de un servicio irregular de suministro de agua y se desea almacenar la mayor cantidad de agua posible para satisfacer el consumo diario.

VII. CONCLUSIONES

Para la instalación de un sistema urbano de drenaje sostenible, conformado por cubiertas verdes y depósitos de infiltración, en parque y azotea de un proyecto existente ubicado en el Condado Naranjo de la Ciudad de Guatemala trata básicamente de trabajos preliminares y estudios de análisis estructural y de suelos. Por otro lado, la instalación depende totalmente de la geometría y accesibilidad de las áreas de instalación. En el caso del tanque, si es de detención o infiltración es necesario considerar una geomembrana que cubra o no el tanque para permitir o no la infiltración; en este caso no se consideró.

Para el diseño de la cubierta verde, tomando en cuenta la ubicación geográfica del edificio, se diseñó una cubierta verde extensiva basado en distinta literatura que toma en cuenta condiciones similares a las actuales en la Ciudad de Guatemala. Tomando en cuenta la disponibilidad en el mercado guatemalteco, se propusieron 6 especies de *Sedum*, *Crassulaceae* y suculentas; plantas que se caracterizan por sus propiedades resilientes a la sequía y que requieren de un mantenimiento bajo. Proponiendo un espesor de sustrato de 10 cm, tomando en cuenta que este tipo de vegetación no tiene raíces largas; un sustrato de 20 % de arena, 30 % de escoria volcánica y piedra pómez, 20 % de grava, 30 % de tierra negra y fibra de coco. Y un espesor 2 mm para la capa de filtro y 2 cm de espesor para el drenaje e impermeabilización. Por otro lado, tomando en cuenta dos métodos de dimensionamiento, se obtuvo un tanque de 32 celdas Aquacell NG tomando en cuenta las condiciones de precipitación de la ciudad y un tanque de 95 celdas Aquacell NG tomando en cuenta la dotación y consumo máximo de un edificio de 9 niveles y 36 apartamentos de 3 habitaciones; con conexión de tubería pvc entre cubierta y tanques de 3 pulgadas y una tubería de descarga del tanque de 2 pulgadas y media.

Únicamente tomando en cuenta el suministro de material del tanque de detención de geoceldas modulares, en este proyecto se tendría una inversión de alrededor Q100,000. Por otro lado, la inversión económica del suministro del sistema de cubierta verde extensiva sería de aproximadamente Q450,000. En el caso de los tanques de detención/infiltración de geoceldas modulares, la inversión debe tomar en cuenta que la instalación es más rápida y fácil de diseñar o modular que otros métodos de construcción de tanques. Asimismo, en el caso de las cubiertas verdes, no solo generan un ahorro mensual del habitante, sino que es un sistema que posee aspectos positivos con respecto a la termicidad de la edificación y su aspecto natural. Estos últimos siendo atractivos para los futuros

habitantes de la zona y obtener una plusvalía por los detalles ambientales y sociales que pueden volver el mercado inmobiliario más atractivo.

VIII. RECOMENDACIONES

- Para el dimensionamiento y diseño de una cubierta verde es recomendable tener acceso a los detalles de refuerzo y materiales de la losa o el elemento que soporte la cubierta para tener certeza de la seguridad estructura que implica instalar una cubierta verde. Con respecto a la instalación del tanque de detención de geoceldas modulares es recomendable también realizar un análisis estructural tomando en cuenta las características del material para determinar si puede soportar el peso que le ejerce el suelo y el flujo de personas y/o vehículos que circulen por encima del tanque.
- Si se desea realizar un dimensionamiento hidráulico de estos sistemas en conjunto con las instalaciones hidrosanitarias de la edificación, se recomienda tomar en cuenta temas de bombeo, pérdidas de carga, pérdidas por fricción, pérdidas por accesorios, entre otros temas para obtener un dimensionamiento más acertado y real.
- La instalación y uso de tanques de detención/infiltración de geoceldas modulares, no solo es necesaria en este tipo de proyectos, sino que agregan un valor al tener beneficios de un tiempo de entrega menor a otros métodos de obra civil de tanques de retención.
- Las cubiertas verdes, no solo generan un ahorro mensual del habitante, sino que es un sistema que posee aspectos positivos con respecto a la termicidad de la edificación y su aspecto natural. Estos últimos siendo atractivos para los futuros habitantes de la zona y obtener una plusvalía por los detalles ambientales y sociales que pueden volver el mercado inmobiliario más atractivo.
- Si el uso del agua pluvial recolectada por cubiertas verdes y almacenada en tanques de celdas modulares será de consumo humano, es recomendable diseñar un sistema de tratamiento que cuente con algún tipo de filtración y caja de sedimentos, desinfección por cloración, un monitoreo de calidad, entre otros, previo al tanque de almacenamiento.
- Para garantizar la hermeticidad del sistema y evitar problemas de filtraciones en el techo, se recomienda implementar métodos de impermeabilización cementicio flexible con aplicación

de métodos de refuerzo de telas de fibra directamente en la losa y juntas frías de la cubierta donde se instalará el sistema de cubierta verde.

- Se recomienda a la academia incentivar el uso e investigación de los sistemas urbanos de drenaje sostenible para ampliar la información disponible de la aplicación de estos mismos sistemas en el territorio guatemalteco para poder solventar distinta problemáticas de las áreas urbanas mayormente pobladas del país.

IX. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, M. B. (2022). Planta echeveria o Echeveria elegans: cuidados. *ecologiaverde.com*. Obtenido de: <https://www.ecologiaverde.com/planta-echeveria-o-echeveria-elegans-cuidados-2445.html>

Aguilar, P. (2007). Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1. Obtenido de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2766C.pdf

Ampim, P., Sloan, J., Cabrera, R., Harp, D., & Jaber, F. H. (2010). *Green roof growing substrates: types, ingredients, composition and properties*. *Journal of Environmental Horticulture*

Arteaga, O. (1994). *Memoria del Taller sobre la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Istmo Centroamericano*, Parlamento Centroamericano, Guatemala.

Barton, K. (2009). Rain gardens: Managing water sustainably in the garden and designed landscape. Obtenido de: <https://www.sudssource.org/holding/pdf/raingardens.pdf>

Building Research Establishment. (2023). *REEAM New Construction International 2018 Technical Manual*. BRE

Camacho, L. (2022). Cuidados de *Sansevieria trifasciata*. Obtenido de: <https://www.ecologiaverde.com/sansevieria-trifasciata-cuidados-1686.html>

Camacho, L. (2023a). Guía de Cuidados y Reproducción de *Echeveria Lilacina*. Obtenido de: Succulent Capital <https://succulentcapital.com/echeveria-lilacina-fantasma-cuidados/>

Camacho, L. (2023b). *Sedum Japonicum* Tokyo Sun - Cuidados y Reproducción. Obtenido de Succulent Capital: <https://succulentcapital.com/sedum-japonicum-tokyo-sun-cuidados/>

Carrera, D., Lombillo, I., Carpio-García, J., & Blanco, H. (2022). *Assessment of different combinations of substrate-filter membrane in green roofs*. *Journal of Building Engineering*

Casavonne, J. L. (2012). Sobrecarga de alcantarillado, problema latente. Obtenido de: <http://rpp.pe/lima/actualidad/lambayeque-sobrecarga-de-alcantarillado-problema-latente->

noticia476398

Castañeda, M. D. C. y. O. A. (2000). *Lineamientos de Política Hídrica Nacional y Propuesta para el Fortalecimiento del Marco Institucional y Legal del Sector Recursos Hídricos*. Plan de Manejo Integrado de los Recursos Hídricos (PMIRH).

CIRIA. (2013). Demonstrating the multiple benefits of SuDS – A business case (Phase 2). Obtenido de: https://www.susdrain.org/files/resources/ciria_guidance/ciria_p993_iTeratuRe_review_-_october2013.pdf

CIRIA. (2015). *SUDS Manual*. CIRIA

CONAMA. (2018). Agua y ciudad de sistemas urbanos de drenaje sostenible. Obtenido de: <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/STs%202018/10-preliminar.pdf>

De la Fuente, L., Perales, S., Rico, M., Doménech, I., & Marco, J. (2021). *Guía Básica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de València*.

Díaz, J. (2021). Cerrando el ciclo urbano del agua. Obtenido de: <https://doi.org/10.24850/bimtaperspectivas-2021-15>

EcoHouses. (s.f.). 6 ejemplos de arquitectura sostenible con tejados verdes. Obtenido de EcoHouses: <https://www.ecohouses.es/6-ejemplos-de-arquitectura-sostenible-con-tejados-verdes/?lang=es>

Empagua. (2022). *Guía de requisitos para la evaluación de proyectos de agua y alcantarillado de la Ciudad de Guatemala*. EMPAGUA

Fernández, B. (2019). Conoce el proyecto ganador para el Corredor Ambiental Urbano del Río Cali en Colombia. Obtenido de Archdaily: <https://www.archdaily.cl/cl/914438/conoce-el-proyecto-ganador-para-el-corredor-ambiental-urbano-del-rio-cali-colombia>

Fernández, P. (2000). *Mecánica de Fluidos*. Universidad de Cantabria

Funcagua. (2020). Clima en Guatemala - Funcagua. Obtenido de Funcagua:

<https://funcagua.org.gt/clima-en-guatemala/>

García, M. (2000). *La evolución del concepto de sostenibilidad y su introducción en la enseñanza*. Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas, 473-486.64

Gazpio, J. (2015). Beneficios de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). Obtenido de: <https://www.iagua.es/blogs/juan-gazpio/beneficios-sistemas-urbanos-drenaje-sostenible-suds>

GCABA. (s.f). Paisajes Urbanos. Obtenido de Paisajes Urbanos: <https://www.buenosaires.gov.ar/desarrollourbano/manualdedisenourbano/paisaje-urbano-verde/parques-y-plazas>

Geoplast. (2018). *Drainroof Manual Técnico - Sistema a alto rendimiento para techos verdes*.

Goins, E. (2023). Panda Plant. House Plants Guide and Tips. Obtenido de house plants expert: <https://www.houseplantsexpert.com/panda-plant.html>

Guatemala Green Building Council. (s.f.-a). Certificaciones internacionales. Obtenido de Guatemala GBC: <https://www.guatemalagbc.org/certificaciones-internacionales/>

Guatemala Green Building Council. (s.f.-b). Proyectos certificados LEED. Obtenido de Guatemala GBC: <https://www.guatemalagbc.org/proyectos-certificados-leed/>

Guevara, E. (2004). *Hidrología Ambiental*. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Venezuela.

Guo, J. C., & Urbonas, B. (1996). *Maximized detention volume determined by runoff capture ratio*. Journal of water resources planning and management. ASCE, 34.

Hernández, D., & Chaparro, T. (2020). *Tratamiento de agua lluvia con fines de consumo humano*. Ciencia E Ingeniería Neogranadina, 30(2), 97-107.

Hoffman, G., Gardner, L., Espie, M., & Dunbar, J. (2020). *Stormwater management guidebook*. Department of energy and environment.

Horton, B., Digman, C., Ashley, R., & Gill, E. (2015). *Best (Benefits of SuDS Tool) Technical*

Guidance. CIRIA. London, UK

INSIVUMEH. (2018). *Best (Curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para la República de Guatemala*.

Lample, K., & Zedek, R. (2020). Urban Water Scarcity And Contamination in the Guatemala City Metropolitan Region: A Management Proposal. Obtenido de Urban water atlas: <https://www.urbanwateratlas.com/2020/05/08/managing-urban-water-scarcity-and-contamination-in-the-guatemala-city-metropolitan-region/65>

Lara, Á., & Prieto, A. (2014). *Integración de sistemas urbanos de drenaje sostenible en la rehabilitación del espacio urbano*. Greencities sostenibilidad: Málaga, 2-3.

Li, W., & Yeung, K. (2014). *A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.05.001>. %20- (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609014000211)

Liu, K., & Baskaran, B. (2003). *Thermal performance of green roofs through field evaluation*. National Research Council Institute for Research in Construction . Proceedings for the First North American Green Roof Infrastructure Conference , Awards and Trade Show, Chicago

Lopez-Ruiz, H., & Rojas, M. (1989). *Qué es la urbanización? Estudios Demográficos y Urbanos*. Obtenido de estudios demográficos y urbanos: <https://estudiosdemograficosyurbanos.colmex.mx/index.php/edu/article/view/46>

MADS. (2022). *¿En qué consiste la construcción sostenible?*. Obtenido de Ministerio de Ambiente: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible>

Magill, J., Midden, K., Groninger, J., & Therrell, M. (2011). *A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research*.

Marchena, D. (2012). *Techos verdes como sistemas urbanos de drenaje sostenible*.

Morales, A. (2008). *Diseño de abastecimiento de agua potable, pavimento rígido, drenaje sanitario y pluvial para la Colonia Las Victorias, Municipio de Jocotenango, Sacatepéquez*. USAC.

Morales, I., Maldonado, C., & Valdés, M. (2022a). Aquí puede revisar los horarios de distribución de agua por zona en la Ciudad de Guatemala. Obtenido de: <https://www.ojoconmipisto.com/aqui-puede-revisar-los-horarios-de-distribucion-de-agua-por-zona-en-la-ciudad-de-guatemala/66>

Morales, I., Maldonado, C., & Valdés, M. (2022b). Distribución de agua por zona en la Ciudad de Guatemala. Obtenido de: <https://www.ojoconmipisto.com/aqui-puede-revisar-los-horarios-de-distribucion-de-agua-por-zona-en-la-ciudad-de-guatemala/>

Municipalidad de Guatemala. (s.f.). Guía de Aplicación del POT de Guatemala. Obtenido de: http://pot.muniguate.com/guia_aplicacion/c1/01_que_es_pot.php

O'Brien, A. (2016). *Structural and geotechnical design of modular geocellular drainage systems*. CIRIA

Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica - "Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. Obtenido de: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf

Ortiz-Hernández, J., Beltrán-Hernández, I., Lizárraga-Mendiola, L., & Vázquez-Rodríguez, G. (2013). *Biorretención y reúso del agua de escorrentía urbana en climas áridos o semi-áridos: una revisión*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Osorio, U. R. (2023). *Echeveria pulvinata*: cuidados, tipos y reproducción. Obtenido de ecología verde: <https://www.ecologiaverde.com/echeveria-pulvinata-cuidados-tipos-y-reproduccion-4532.html>:text=Los %20cuidados %20de %20Echeveria %20pulvinata, de %20hojas %2C %20divisi %C3 %B3n %20o %20semilla

Porsche, U., & Kohler, M. (2003). *Life cycle costs of green roofs - A Comparison of Germany, USA and Brazil*.

Ramos, S. (2019). Anarquía y privatización: Datos y rostros de la desigualdad del agua en Guatemala. Obtenido de: <https://www.no-ficcion.com/project/rostros-datos-desigualdad-agua-guatemala>

Seco, L. (2017). *Estudio sobre la utilización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en el municipio de Moncada (Valencia)*. Universitat Politècnica de Valencia, 14-18.

Subramanya, K. (2013). *Engineering Hydrology*.

Sustainable SITES Initiative. (2023). SITES v2 rating system. Obtenido de Sustainable sites initiative: <https://www.sustainablesites.org/sites/rating-system>

Talebi, A., Bagg, S., Sleep, B., & O'Carroll, D. (2019). *Water retention performance of green roof technology: A comparison of canadian climates*. Ecological Engineering, 126, 1-15. 67

Toj, J. (2016). *Propuesta de una Guía para la Planificación, Diseño e Instalación de un techo verde*. Universidad de San Carlos de Guatemala, 49-52.

U.S. Green Building Council. (2023). *LEED v4.1 BD+C reference guide*. USGBC.

Vecchia, F., Castaneda, G., & Quiroa, J. A. (2007). *Aplicación de cubiertas verdes en climas tropicales: Ensayo experimental comparativo con techumbres convencionales*. Tecnología y Construcción

Villarreal, E. L. (2005). *Beneficial Use of Stormwater*.

Watkins, D. (1991). *The Hydraulic Design and Performance of Soakaway*.

Weather Spark. (2022). Climate and Average Weather Year Round in Guatemala City. Obtenido de: <https://weatherspark.com/y/11693/Average-Weather-in-Guatemala-City-Guatemala-Year-RoundSections-Sources>

X. APÉNDICES

Universidad del Valle de Guatemala
Trabajo de graduación
Luis Diego Orellana ; Carné: 19661
Octubre 2023

DIMENSIONAMIENTO DE TANQUE DE DETENCIÓN

Ecuación de intensidad de lluvia en mm/h
por Sherman 1931:

$$I_{D,T_r} = \frac{KT_r^m}{(D+B)^n}$$

Ecuación de intensidad de lluvia en mm/h
de la estación INSIVUMEH:

$$I = \frac{799T_r^{0.181}}{(D+9.91)^{0.757}}$$

Coefficientes dependientes de las condiciones climáticas de la Ciudad de Guatemala,
según INSIVUMEH 2018:

$$K := 799 \quad B := 9.91 \quad m := 0.181 \quad n := 0.757$$

Coefficiente de escorrentía según caudal pico (después del desarrollo):

$$C_p := 0.95 \quad \text{Cercano a 1 debido a que es casi impermeable el área.}$$

Área de recolección en terraza de la torre de edificio en m²:

$$A := 280$$

Caudal antes del desarrollo en l/s:

$$Q_A := 4.78$$

Tiempo de retorno en años:

$$T_r := 30$$

Figura 26. Memoria de cálculo de duración máxima de precipitación en Ciudad de Guatemala.

Fuente: Elaboración propia en PTC Mathcad Prime 7.

Derivada de ecuaciones de método racional modificado, intensidad de lluvia de insivumeh y ecuación de volumen de diseño:

$$f := \frac{60 \cdot D \cdot C_p \cdot A}{3600} \cdot (-K \cdot T_r^m \cdot n \cdot (D+B)^{-n-1}) + 60 \cdot C_p \cdot \frac{A}{3600} \cdot \left(\frac{K \cdot T_r^m}{(D+B)^n} \right) - 30 \cdot Q_A = 0 \xrightarrow{\text{solve}, D} 37.014828210492620233$$

Duración máxima de 37 minutos

DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍA DE CONEXIÓN DE CUBIERTA VERDE Y TANQUE DE RETENCIÓN

Cuadro de diámetros comerciales de tuberías de PVC:

Tabla IX. Diámetros comerciales de tuberías PVC

PRESION	DIAMETRO COMERCIAL (PULG)
125 psi = 87.88 m.c.a	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 18
160 psi = 112.49 m.c.a	1, 1¼, 1½, 2, 2½, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15
250 psi = 175.77 m.c.a	¾, 1, 1¼, 1½, 2, 2½, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12

Caudal antes del desarrollo en l/s:

$$Q := 4.78$$

Altura de azotea hasta nivel de tanque de retención en metros (pérdida de carga):

$$hf := 23.83$$

Longitud horizontal de la salida de cubierta verde y entrada de tanque de retención, en metros:

$$L := 0.75$$

Figura 27. Continuación de memoria de cálculo de duración máxima e inicio de cálculo de tubería de conexión.

Fuente: Elaboración propia en PTC Mathcad Prime 7.

Coefficiente de descarga de PVC:

$$C := 150$$

Fórmula de Haze-Williams para hallar diámetro por medio de pérdida de carga:

$$\phi := \left(\frac{1743.811 \cdot L \cdot Q^{1.852}}{C^{1.852} \cdot hf} \right)^{\frac{1}{4.871}} = 0.614$$

Se obtuvo un resultado menor al mínimo de 125 psi, según tabla de diámetros comerciales. Por lo que se utiliza 3 pulgadas (el mínimo).

$$\phi := 3 \text{ in}$$

DIMENSIONAMIENTO DE TUBERÍA DE CARGA DE SALIDA DEL TANQUE DE RETENCIÓN

Coefficiente de descarga

$$Cd := 0.82$$

Se supone como vena adherida, según la forma de la tubería de descarga.







Casos	Cc	Cv	Cd	Observaciones
	0.62	0.985	0.61	Valores medios para orificios comunes de pared delgada.
	0.52	0.98	0.51	Vena libre.
	1.00	0.75	0.75	Vena adherida.
	0.62	0.985	0.61	Vena libre (valores medios)
	1.00	0.82	0.82	Vena adherida.
	1.00	0.98	0.98	Bordes redondeados acompañando los filetes líquidos.

Figura 28. Continuación de cálculo de tubería de conexión e inicio de cálculo de tubería de descarga de tanque.

Fuente: Elaboración propia en PTC Mathcad Prime 7.

Ubicación de distancia de la tubería de salida con respecto al nivel del agua, en metros:

$$h := 0.4$$

Caudal antes del desarrollo en m3/s:

$$Q := 0.0048$$

Ecuación de caudal de descarga, despejada a área en m2:

$$A := \frac{Q}{Cd \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot h}} = 0.002$$

Obtención de diámetro por medio de área anterior en metros:

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \cdot m = 0.052 \text{ m} \quad D = 2.031 \text{ in} \quad D := 2.5 \text{ in}$$

Se necesita una tubería de 2 pulgadas y media, que es el diámetro más grande después de 2 pulgadas.

Figura 29. Fin de memoria de cálculo de tubería de descarga de tanque de retención.

Fuente: Elaboración propia en PTC Mathcad Prime 7.

Intensidad de lluvia (mm/hr) según ecuación de estación INSIVUMEH para distintos Tr y D		
Área de cubierta verde	280	m ²

Tr (años)	D = 10 min	I (mm/hr)
2	10	94.1101065
5	10	111.087043
10	10	125.935983
20	10	142.769772
25	10	148.654129
30	10	153.641586
50	10	168.524639
100	10	191.051229

Tr (años)	D = 30 min	I (mm/hr)
2	30	55.5922614
5	30	65.6207942
10	30	74.3922872
20	30	84.3362606
25	30	87.8122394
30	30	90.7584057
50	30	99.5500499
100	30	112.856847

Tr (años)	D = 60 min	I (mm/hr)
2	60	36.3677939
5	60	42.9283403
10	60	48.6665464
20	60	55.1717751
25	60	57.445719
30	60	59.3730658
50	60	65.1244545
100	60	73.8296021

Tr (años)	D = 120 min	I (mm/hr)
2	120	22.7512768
5	120	26.8554797
10	120	30.4452359
20	120	34.5148328
25	120	35.9373861
30	120	37.1431123
50	120	40.7411154
100	120	46.1869564

Figura 30. Memoria de cálculo de intensidades de lluvia preliminares.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Según la Guía de requisito para la evaluación de proyectos de agua y alcantarillado de la Ciudad de Guatemala de empagua el mínimo de intensidad de lluvia para cálculo de tanque de retención son 150 mm/h. La duración de 10 minutos es la única que da intensidades de 150 mm/hr.

Coeficiente de escorrentía	
C	0.4

Este coeficiente es previo al desarrollo

Caudal antes del desarrollo por método racional modificado

Qa	4.78	l/s
----	------	-----

D	37.014	min
---	--------	-----

i	65.81	mm/hr
---	-------	-------

$$Q = \frac{CiA}{360}$$

Duración máxima obtenida en procedimiento de Mathcad

Figura 31. Continuación de cálculo de caudales de diseño para dimensionamiento de tanque de retención.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

Qp	4.86	l/s
----	------	-----

Qa	2.05	l/s
----	------	-----

Vs	8218.67	l
	8.22	m3

Volumen celdas	0.2736	m3
----------------	--------	----

No. Celdas	30.04
------------	-------

Cálculo de caudal antes de desarrollo calibrado con intensidad real

0.95	0.288
------	-------

Figura 32. Cálculo de celdas geocelulares de tanque de retención Aquacell NG.

Fuente: Elaboración propia en Microsoft Excel.

DIMENSIONAMIENTO DE TANQUE SEGÚN DOTACIÓN

Dotación EMPAGUA de apartamento de 3 habitaciones:

$$Dot := 1200 \quad \text{L/apartamento/día}$$

El edificio cuenta con 4 apartamentos por nivel, tomando en cuenta 9 niveles

(Empagua, 2008)

DOTACIONES RECOMENDADAS

CAPITULO 7

Tipo	Factor
Habitacional o multifamiliar	
• Residenciales (>700 m ²)	1 dormitorio = 500 L / apartamento / día
• Urbanizaciones	2 dormitorios = 850 L / apartamento / día
• Apartamentos o vivienda multifamiliar (200 L/hab/día)	3 dormitorios = 1200 L / apartamento / día
• Visitantes	4 dormitorios = 1350 L / apartamento / día
• Dotación por habitante	25 litros / visitante / día
• Áreas comunes o amenities	200 litros / persona / día
	3 litros / m ² / día

Caudal medio:

$$Q := 1200 \cdot 4 \cdot 9 \cdot \frac{l}{day} = 0.5 \frac{l}{s}$$

No se multiplica por una población futura debido a que es un edificio con capacidad limitada.

Factor de día máximo:

Según Infom - Unepar:

Poblaciones mayores a 1000 habitantes el FDM será 1.2.

Poblaciones menores a 1000 habitantes el FDM será entre 1.2 y 1.5.

(Morales, 2008)

Tomando en cuenta un aproximado de 4 habitantes por apartamento, sería un total de 144 habitantes, entonces:

$$FDM := 1.5$$

Caudal de diseño:

$$Q_m := Q \cdot FDM = 0.75 \frac{l}{s}$$

Figura 33. Cálculo de volumen por dotación.

Fuente: Elaboración propia en PTC Mathcad Prime 7.

Factor de volumen de tanque:

Según Infom-Unepar se recomienda un 40% del caudal para procedimiento de cálculo de volumen de un tanque de abastecimiento.

(Morales, 2008)

$$FV := 40\%$$

Volumen de tanque:

$$Vol := \left(\frac{0.4 \cdot 0.75 \cdot 86400}{1000} \right) \cdot 1 \text{ m}^3 = 25.92 \text{ m}^3$$

Número de celdas de tanque Aquacell NG:

$$No.celdas := \frac{Vol}{0.6 \text{ m} \cdot 1.2 \text{ m} \cdot 0.4 \text{ m} \cdot 0.95} = 94.737$$

Se utiliza el 95% de la capacidad de retención del tanque. Este porcentaje se expresa en la ficha técnica del Aquacell NG.

Figura 34. Continuación de cálculo de volumen de tanque por dotación.

Fuente: Elaboración propia en PTC Mathcad Prime 7.

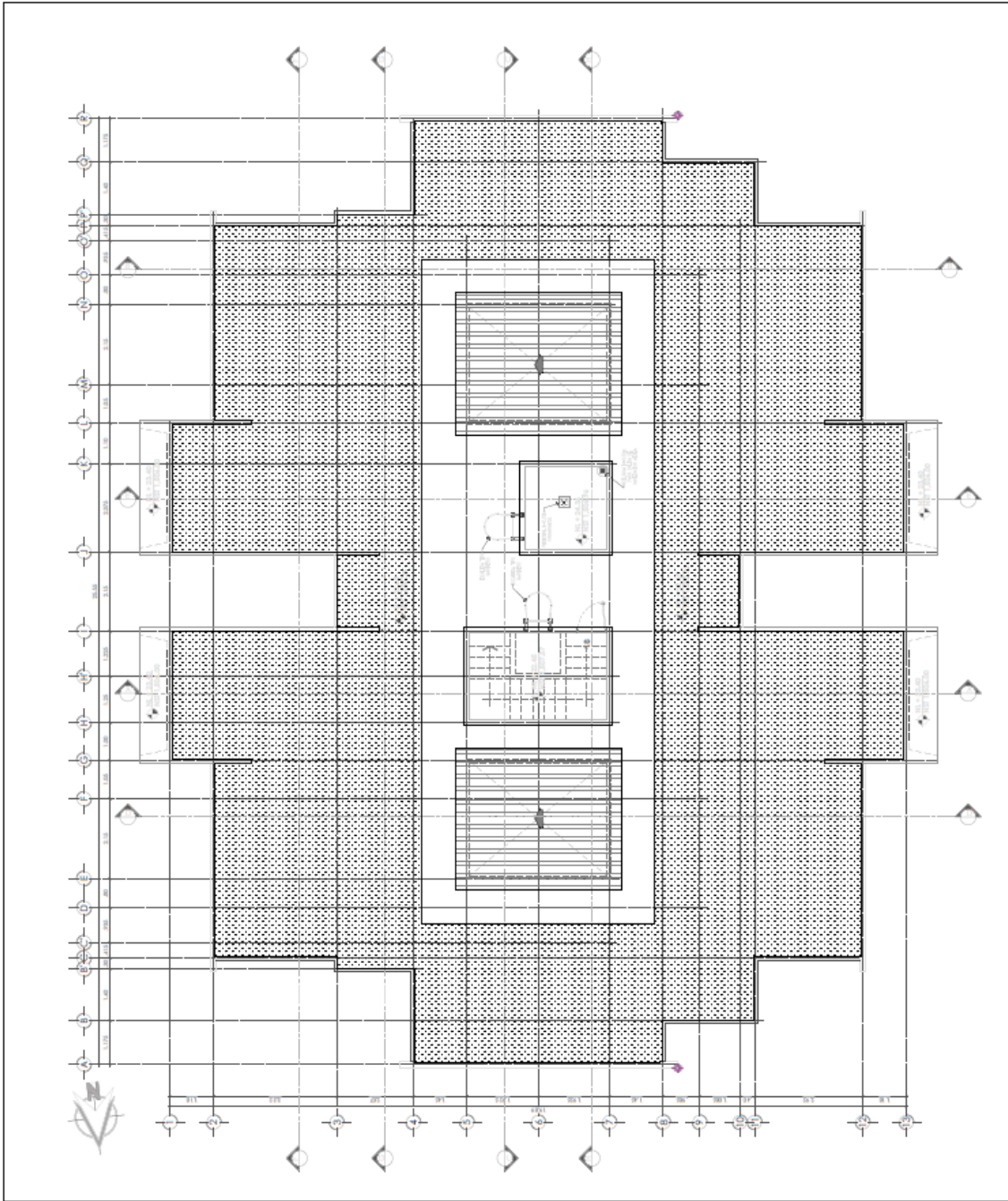


Figura 35. Plano planta de techos con cubiertas verdes.

Fuente: Plano elaborado por equipo de Condado Naranja y modificado (adición de cubiertas verdes) por elaboración propia.

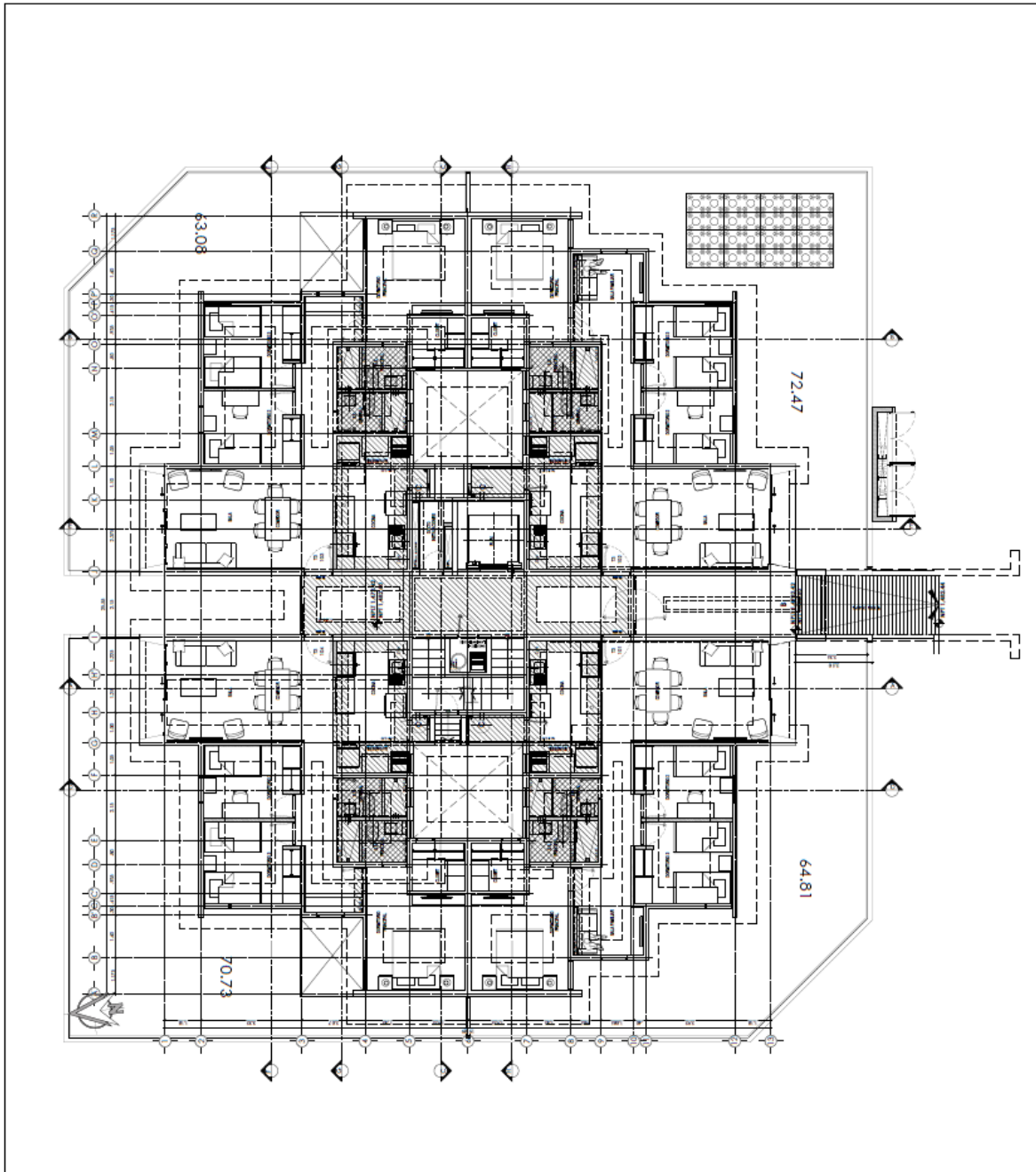
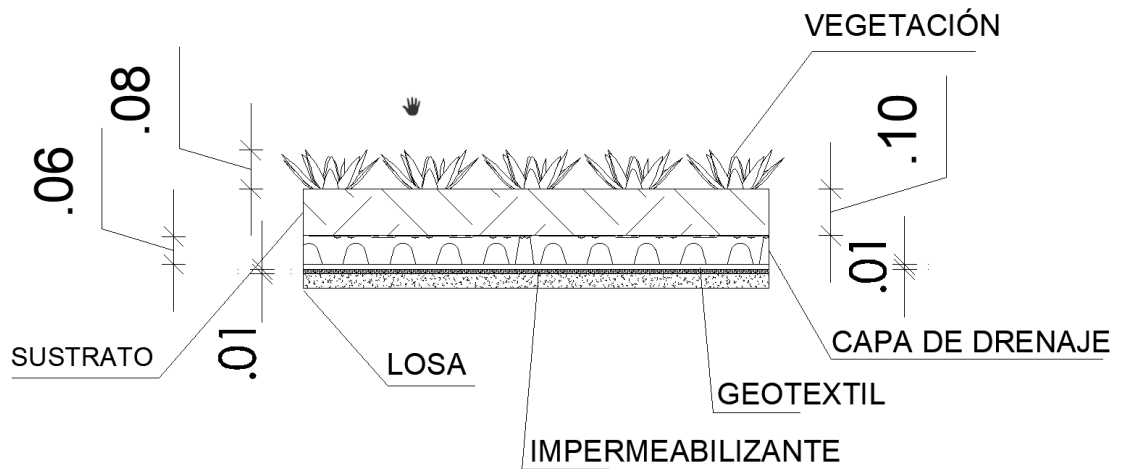


Figura 36. Plano de planta de nivel 1 con ubicación de tanque de retención.

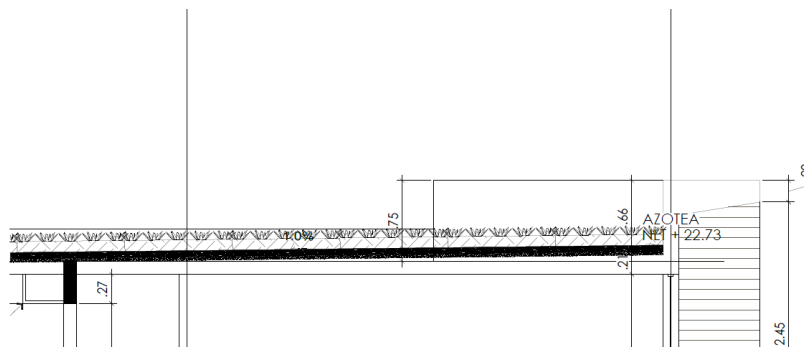
Fuente: Plano elaborado por equipo de Condado Naranjo y modificado (adición de tanque de retención) por elaboración propia.



DETALLE SECCIÓN CUBIERTA VERDE
TORRE '3'

Figura 37. Plano de sección de detalle de cubierta verde.

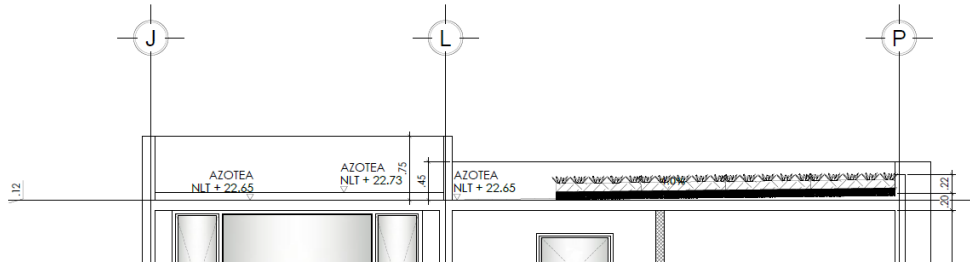
Fuente: Elaboración propia



DETALLE SECCIÓN E; 7-13
TORRE '3'

Figura 38. Detalle sección E; Ejes 7-13.

Fuente: Plano elaborado por equipo de Condado Naranjo y modificado (adición de cubiertas verdes) por elaboración propia.

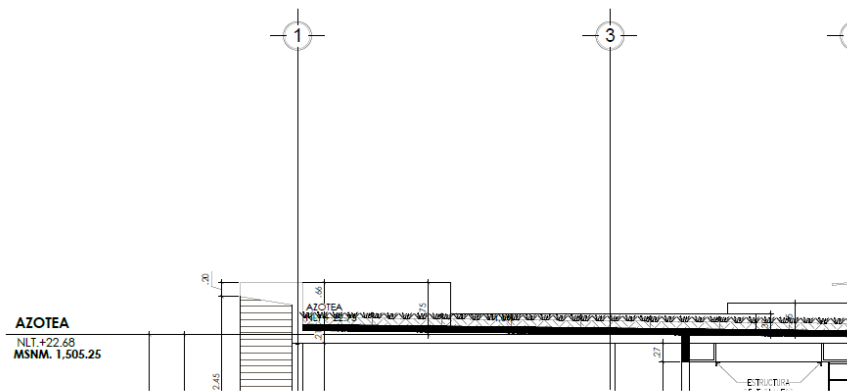


DETALLE SECCIÓN F; J-P

TORRE '3'

Figura 39. Detalle Sección F; J-P.

Fuente: Plano elaborado por equipo de Condado Naranjo y modificado (adición de cubiertas verdes) por elaboración propia.

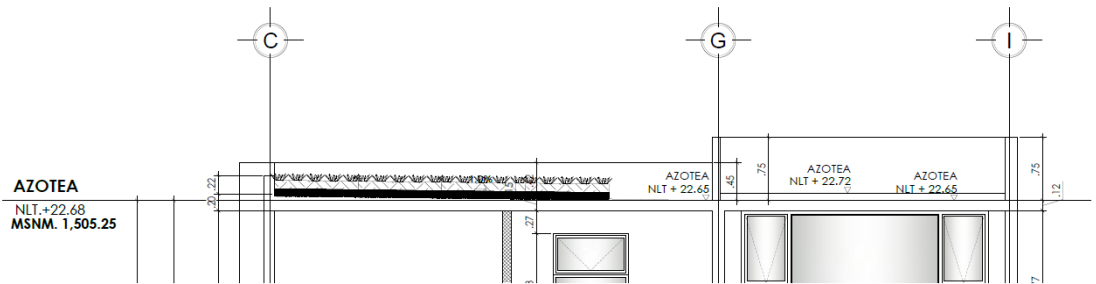


DETALLE SECCIÓN E; 1-3

TORRE '3'

Figura 40. Detalle Sección E; 1-3.

Fuente: Plano elaborado por equipo de Condado Naranjo y modificado (adición de cubiertas verdes) por elaboración propia.

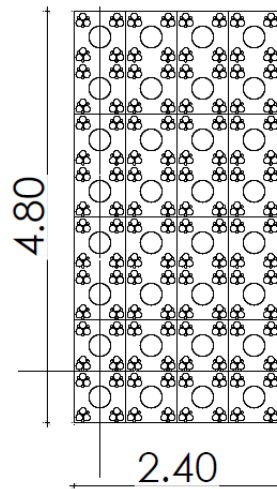


DETALLE SECCIÓN F; C-I

TORRE '3'

Figura 41. Detalle sección F; Ejes C-I.

Fuente: Plano elaborado por equipo de Condado Naranjo y modificado (adición de cubiertas verdes) por elaboración propia.



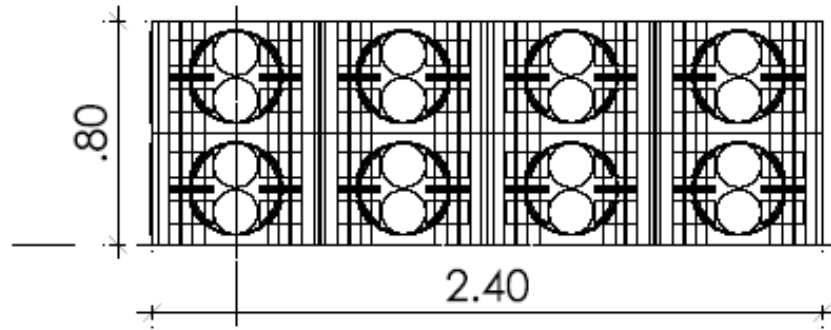
PLANTA

TANQUE DE RETENCIÓN AQUACELL NG

SIN ESCALA

Figura 42. Planta Aquacell NG.

Fuente: Elaboración propia con librerías BIM de Amanco Wavin.



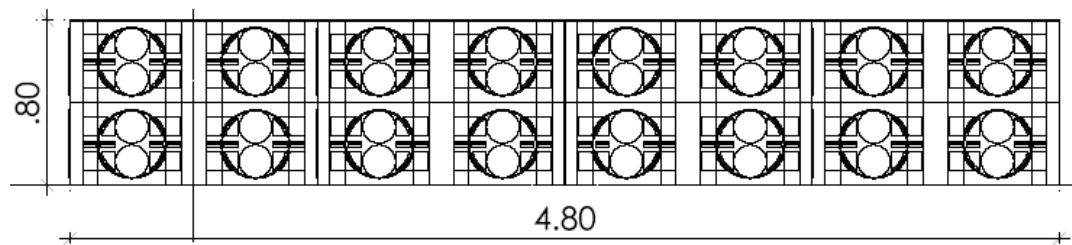
ELEVACIÓN FRONTAL

TANQUE DE RETENCIÓN AQUACELL NG

SIN ESCALA

Figura 43. Elevación frontal Aquacell NG.

Fuente: Elaboración propia con librerías BIM de Amanco Wavin.



ELEVACIÓN LATERAL

TANQUE DE RETENCIÓN AQUACELL NG

SIN ESCALA

Figura 44. Elevación lateral Aquacell NG.

Fuente: Elaboración propia con librerías BIM de Amanco Wavin.

XI. GLOSARIO

- **Biodiversidad urbana:** Diversidad de especies de fauna y flora en el contexto urbano que se podrían promover por medio de la instalación y mantenimiento de SUDS con vegetación.
- **Capa de sustrato:** Capa material que funciona como medio para el crecimiento y mantenimiento de vegetación de una cubierta verde.
- **Caudal:** Cantidad de agua que fluye a través de un medio natural o artificial en un período de tiempo específico.
- **Cubierta verde:** Son sistemas caracterizados por utilizar vegetación, sustrato y demás componentes para volver un área verde dónde normalmente sería permeable, utilizados en terrazas, balcones o en cualquier espacio abierto en edificios.
- **Drenaje sostenible:** Gestión sostenible del agua de lluvia para la prevención de inundaciones por medio de estrategias y prácticas de bajo impacto ambiental.
- **Escorrentía:** Flujo de agua superficial resultante del agua pluvial y restante de los demás procesos del ciclo hidrológico (infiltración, evaporación, evapotranspiración, entre otros).
- **Gestión de aguas pluviales:** Conjunto de estrategias y logísticas con el objetivo de direccionar, almacenar, tratar y controlar el agua pluvial para prevenir inundaciones, mantener la calidad del agua y hacer uso sostenible del recurso hídrico.
- **Impermeabilización:** Práctica de aplicación de capa que restringe la filtración de agua en la estructura de un edificio.
- **Infiltración:** Proceso del ciclo hidrológico que trata del proceso o capacidad de la absorción del agua en suelo o sustrato, cuya importancia es la reducción de escorrentía superficial en áreas impermeables (urbanas) y suministro a depósitos de agua subterráneos u océanos.
- **Intensidad de lluvia:** Es la cantidad de precipitación en términos de altura de lluvia que se recolecta en un período de tiempo determinado sobre un área específica.

- **Período de retorno:** Medida estadística para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento natural como una tormenta durante un tiempo específico.
- **Permeabilidad:** Capacidad de un material de permitir el flujo de agua por medio del mismo. Característica importante en tema de diseño de cubiertas verdes y otros sistemas urbanos de drenaje sostenible.
- **Recarga de acuíferos:** Proceso del ciclo hidrológico relacionado con la infiltración del agua por medio del suelo.
- **Retención:** Acción de retener agua pluvial temporalmente en sistemas como cubiertas verdes, tanques de retención para un uso posterior o dirección a la red de alcantarillado público.
- **Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS):** Sistemas utilizados en el medio urbano con el fin de gestionar eficientemente el recurso hídrico en función de combatir las problemáticas de la urbanización en aspectos ambientales, sociales y otros.
- **Tanque de geoceldas modulares:** Tanques de celdas tridimensionales prefabricados de polímeros resistentes a la carga del suelo y transitoria.
- **Tanque de infiltración o retención:** Sistemas diseñados y utilizados para gestionar el recurso hídrico, mayormente agua pluvial, en cuestión de control de caudal, reducción de carga hídrica, retención de agua y/o permisión de la infiltración natural del ciclo hídrico en un área impermeable.