

Techos verdes como sistemas urbanos de drenaje sostenible



Diana Cecilia Marchena Ávila.
Pontificia Universidad Javeriana
31/05/2012

Trabajo de grado: Techos verdes como sistemas urbanos de drenaje sostenible

Director: Jaime A. Lara Borrero IC., MSc.PhD.

Pregrado: Ingeniería Civil

Foto Portada:

Universidad Tecnológica de Nanyang (Singapur).
Fuente: elplanb-arquitectura.

Contenido

1	Introducción	4
2	Características generales	¡Error! Marcador no definido.
2.1	Sistemas urbanos de drenaje sostenible.	6
2.1.1	Prácticas estructurales:	7
2.1.2	Prácticas no estructurales:	8
2.2	Techos verdes	8
2.2.1	Según el espesor del sustrato o medio de crecimiento:	10
2.2.2	Según su propósito:	10
2.2.3	Según la tecnología de construcción empleada:	11
3	Políticas e incentivos a nivel nacional e internacional para la instalación de techos verdes	12
4	Esquema arquitectónico	29
4.1	Factores que Condicionan el diseño arquitectónico.	29
4.2	Efectos aislamiento térmico	31
4.3	Efectos de aislamiento acústico	34
5	Esquema ambiental a escala Global	36
5.1	Preservación de zonas verdes y generación de hábitat.	36
5.2	Efecto invernadero y el efecto isla de calor	37
5.3	Impacto ambiental de los componentes de los techos verdes	39
6	Esquema ambiental a escala local	42
6.1	Diseño	42
6.1.1	Dimensionamiento	42
6.1.2	Diseño hidráulico	56
6.1.3	Diseño estructural.	60
6.2	Construcción	61
6.3	Mantenimiento	66
6.4	Comportamiento Hidrológico	68
6.5	Calidad del agua	70
6.6	Calidad del aire.	71
7	Oportunidades de investigación	73
8	Referencias bibliográficas	76

1 Introducción

Los techos verdes son sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) conformados por múltiples capas, que se instalan en la cubierta de las edificaciones con diferentes intenciones como la captación de agua lluvia con el fin de reducir los volúmenes de escorrentía, la generación de hábitat para diferentes especies, o simplemente por su valor estético (United States. Environmental Protection Agency, 2000; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b). La implementación de éstos trae múltiples beneficios, como extender la vida útil de las cubiertas, mejorar la calidad del aire, generar aislamiento térmico y acústico, y algunas ventajas a nivel social como generación de empleo, incremento del valor comercial de las edificaciones, etc. (Callaghan, Peck, et al., 1999; United States. Environmental Protection Agency, 2000; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Taylor, 2008).

Para la realización del presente trabajo se efectuó una revisión bibliográfica en la que se seleccionaron fuentes de información como artículos de revistas, guías técnicas o manuales, libros, Páginas web, normas o códigos y bases de datos como Sience Direct, Access Engineering y SpringerLink. Las palabras claves utilizadas para la búsqueda fueron: cubiertas verdes, techos verdes, cubiertas vegetadas, eco-techos, sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), tecnologías de bajo impacto y sistemas de captación de aguas lluvias.

La temática se desarrolla de lo general a lo particular, y se organiza según los diferentes puntos de vista que existen en la literatura técnico-científica al respecto. Se identificaron dos grandes formas de ver los techos verdes, una hace referencia a lo arquitectónico donde se expone todo lo relacionado con el confort y el diseño del espacio en general, y la otra está enfocada hacia la visión de la ingeniería ambiental, donde se desarrollan los temas técnicos de diseño, construcción y mantenimiento, y se tiene en cuenta la influencia sobre el medio ambiente, a escala local y global.

En la primera parte de la monografía se definen de manera general los SUDS, se realiza una descripción de sus características, y se establece una clasificación dentro de la cual se catalogan los techos verdes como sistemas de control de superficies. Seguido a esto se exponen las generalidades de los techos verdes, su definición, las ventajas y desventajas de su implementación, sus componentes, y las diferentes maneras de clasificarlos.

En el ámbito legal se lleva a cabo una consulta de las políticas para la promoción e implementación de techos verdes, desarrolladas por 15 ciudades ubicadas en diferentes regiones del mundo. Entre las mencionadas políticas se destaca el desarrollo de un plan de acción local, la instalación de techos demostrativos, la implantación de sistemas de calificación, el otorgamiento de incentivos directos e indirectos, la obligatoriedad en la

instalación, entre otras. Posteriormente se establece una comparación con respecto a lo que se ha realizado en Bogotá hasta el momento, lo cual lleva a la conclusión de que es necesario avanzar en la implementación de las diferentes estrategias, hasta decretar como obligatoria la instalación de estos sistemas.

En el enfoque arquitectónico, se identifican los elementos de los techos verdes que condicionan el diseño de las cubiertas y algunas partes de la edificación, además se desarrollan los temas relacionado con las condiciones de confort como lo son las capacidades de aislamiento térmico y acústico de los techos verdes.

El esquema ambiental resalta primero lo relacionado con la escala global, como lo son la influencia que tiene la construcción de techos verdes en cuanto al incremento de zonas verdes, la generación de hábitat, la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, la disminución del efecto isla de calor y el impacto ambiental que generan sus componentes durante el proceso de fabricación. Seguido a esto se desarrolla lo relacionado con la escala local, con temas como el diseño estructural e hidráulico, la construcción y el mantenimiento de los techos verdes, y se analiza la influencia de éstos en cuanto al comportamiento hidrológico y lo relacionado con la calidad del agua y del aire.

Finalmente se realiza un análisis comparativo de las fuentes, encontrando desacuerdos en algunos temas como: la influencia de las plantas sobre cantidad de la escorrentía superficial y la propiedad de aislamiento acústico, la conformación del sustrato, el comportamiento hidrológico, entre otros. Además se destacan algunas estrategias que se pueden implementar en Colombia para fomentar la construcción de techos verdes, como el uso de incentivos y la construcción de techos verdes demostrativos, y algunos estudios como la adaptación de los métodos de cálculo de capacidad hidráulica, el análisis del comportamiento térmico de los techos verdes mediante un estudio de transferencia de calor, cuyos resultados deben ser validados para las condiciones climáticas del país con el fin de evaluar comportamiento del techo verde en nuestro entorno.

2 Generalidades

2.1 Sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS, UK), también conocidos en Norteamérica como Best Management Practices (BMPs) y Low Impact Development (LID), y en Australia como Water Sensitive Urban Design (WSUD) y Natural Drainage Systems (NDS) son sistemas de drenaje de aguas lluvias y de escorrentía diseñados con el fin de contribuir al alcance de un desarrollo sostenible. La implementación de dichos sistemas se fundamenta en la filosofía de aproximarse al mecanismo de drenaje natural que posee el espacio antes de ser intervenido por el hombre, en el cual el agua penetra el suelo, lo satura y una parte es absorbida por la vegetación antes de que ocurra una escorrentía significativa (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007a). El principal objetivo de los SUDS es disminuir el impacto negativo del desarrollo urbano en la cantidad y la calidad del agua de escorrentía y maximizar la posibilidad de biodiversidad mediante la generación de hábitat (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

En la mayoría de los sistemas tradicionales de evacuación de aguas lluvias, grandes cantidades de agua son enviadas directamente a los sistemas de tuberías, que las conducen hacia cuencas que se encuentran en la zona urbana. El agua lluvia en su recorrido por las amplias superficies impermeables de la ciudad recoge partículas de polvo e impurezas, que son llevadas y depositadas sin ningún tratamiento al sistema de alcantarillado. Sin embargo el hecho de tratar el agua lluvia como un problema que requiere ser canalizado y evacuado lo más rápido posible, es la principal causa de la imposibilidad de controlar su comportamiento. Por esta razón, los SUDS funcionan con un principio completamente opuesto al de los sistemas tradicionales, ya que tienen la capacidad de captar el agua y atenuar la escorrentía superficial, realizando la evacuación de manera gradual y controlable (P. Jones and Macdonald, 2007).

Entre las ventajas que tiene la implementación de SUDS en lugar de los sistemas convencionales de drenaje, también se encuentra la capacidad de disminuir la concentración de contaminantes, el fomento de la infiltración de agua que implica la conservación de los acuíferos subterráneos, el incremento del valor estético de las áreas intervenidas y la generación de hábitat para algunas especies, entre otras (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007a).

Los SUDS se pueden organizar en dos grandes grupos: las prácticas estructurales, y las prácticas no estructurales, que a su vez se subdividen de la siguiente forma: (United States. Environmental Protection Agency, 1999; United States. Environmental Protection

Agency, 2000; Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000a; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

2.1.1 *Prácticas estructurales:*

Se clasifican en las siguientes categorías principales:

De infiltración: Capturan el agua de escorrentía y la infiltran en el terreno, un ejemplo son las lagunas de infiltración, y los pozos de absorción.

De detención: Capturan un volumen de escorrentía y lo retienen temporalmente para su posterior liberación. No retienen grandes volúmenes de agua entre eventos de escorrentía. Un ejemplo de este sistema son las lagunas de detención.

De retención: Capturan un volumen de escorrentía y lo retienen hasta que es desplazado parcial o totalmente por un nuevo evento de escorrentía, como es el caso de los estanques húmedos.

Humedales Construidos: Son estanques con áreas poco profundas, y vegetación propia de los humedales¹, que remueven algunos contaminantes presentes en el agua, y promueven la generación de hábitat.

De filtración: Usan una combinación de material granular filtrante como arena, suelo, material orgánico, carbón o membranas para remover contaminantes en el agua de escorrentía. Un ejemplo de éstos son los medios filtrantes, conformados por materiales permeables y los sistemas de biorretención, que corresponden a áreas vegetadas que recogen y tratan el agua.

Canales abiertos (de vegetación): Sistemas diseñados para conducir y tratar el agua de escorrentía, como las franjas filtrantes y las cunetas verdes.

¹ Los tipos de vegetación más frecuentes en humedales son: manglar (mangle), gramalotes (*Panicum fasciculatum*), varzea (*Euterpe oleracea*), zurales, morichales (*Mauritia flexuosa*) y bosques de galerías (*Populus ssp*).

(http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=com_content&task=view&id=171&Itemid=171)

Control de superficies: Son aquellos sistemas que Minimizan la conexión directa entre superficies impermeables con el sistema de alcantarillado, por ejemplo los techos verdes.

Sistemas provistos por proveedores: Como separadores de agua y aceite y dispositivos hidrodinámicos.

2.1.2 Prácticas no estructurales:

Entre las prácticas no estructurales se destacan actividades como el control de la disposición de desechos del hogar y materiales peligrosos, exigencia de orden y limpieza en espacios comerciales y a nivel industrial, la modificación del uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas, la inclusión de políticas de manejo de escombros, el control de la disposición de residuos animales, el correcto mantenimiento a cuencas, caminos, calles, estacionamientos y zanjas, la detección y eliminación de descargas ilícitas, programas educativos y de asistencia, manejo del drenaje de aguas pluviales, y promoción de desarrollos de bajo impacto y del ordenamiento territorial.

De los SUDS anteriormente mencionados, se hará énfasis en los sistemas de control de superficie, específicamente en los techos verdes.

2.2 Techos verdes

Los techos verdes son sistemas de múltiples capas que revisten las cubiertas de las edificaciones con vegetación, con el fin de interceptar y retener la precipitación, reduciendo los volúmenes de escorrentía y atenuando los caudales máximos que se generan a nivel urbano, todo esto mediante la reducción de superficies impermeables (United States. Environmental Protection Agency, 2000; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

La implementación de techos verdes tiene múltiples ventajas entre las que sobresalen: extender la vida útil de las cubiertas, mejorar la calidad del aire ya que tienen la capacidad de remover contaminantes que se encuentran presentes en la atmósfera urbana, reconstruir el paisaje natural y generar hábitat, retener altos niveles de humedad en áreas de la ciudad, generar aislamiento térmico lo cual lleva a minimizar el consumo energético, reducir la cantidad del agua de escorrentía y mejorar en la calidad de esta, absorber el ruido, mitigar el efecto isla de calor que se genera en las ciudades debido a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, ahorro de tipo económico en cuanto al mantenimiento de la estructura, generar empleo, mejorar la estética de las edificaciones e incrementar su valor comercial, entre otras (Callaghan, Peck, et al., 1999; United States.

Environmental Protection Agency, 2000; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Taylor, 2008).

Por otra parte, las principales barreras para la implementación de los techos verdes son los elevados costos, la dificultad de instalación en cubiertas inclinadas, la ausencia de personal capacitado para su construcción, las deficiencias en la divulgación al público de los beneficios, la falta de incentivos y reconocimientos por parte del gobierno y los inconvenientes técnicos asociados a la falta de productos y de estándares técnicos que regulen la construcción de techos verdes (Callaghan, Peck, et al., 1999; Lanarc Consultants Ltd., Kerr Wood Leidal Associates Ltd., et al., 2005; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Como se mencionó inicialmente, un sistema de techos verdes está compuesto por varias capas como se observa en la Figura 1. La capa impermeable es la capa base de cualquier techo verde, usualmente además de su función primordial también funciona como membrana anti-raíces. Seguida de ésta se

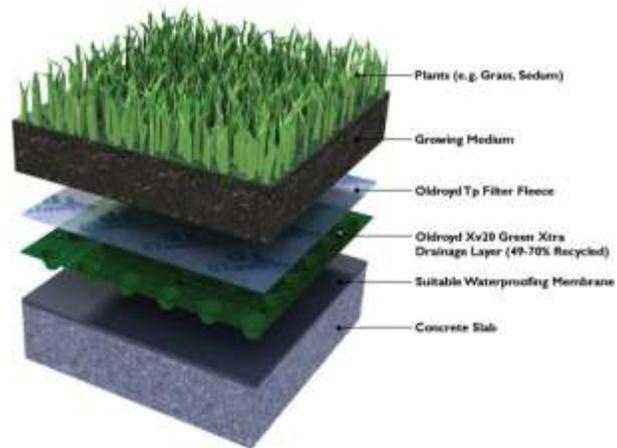


Figura 1. Componentes del techo verde

Fuente: safeguardeurope.com

encuentra la capa de drenaje, que tiene como función eliminar el exceso de agua de la cubierta. Las capas de drenaje comerciales tienen forma de celdas y orificios por los que se evacúa el agua (Dunnett and Clayden, 2007; Hawaii Commission on Water Resource Management, 2008).

Entre la capa de drenaje y el medio de crecimiento generalmente se ubica un geotextil, con el fin de evitar que el sustrato obstruya los orificios de la capa de drenaje. El sustrato es el medio que permite el desarrollo de las plantas, usualmente se compone de un suelo artificial que es un material muy liviano, o de compuestos agregados, como ladrillos reciclados triturados, gránulos ligeros de arcilla expansiva, vermiculita o perlita mezcladas con una baja porción de materia orgánica. Por último se encuentra la capa vegetal (Dunnett and Clayden, 2007; Hawaii Commission on Water Resource Management, 2008).

Los techos verdes se pueden clasificar de diversas formas, la más común de ellas es según el espesor del sustrato ya que esta característica es la que define varias de las propiedades que tendrá el techo verde. Sin embargo también pueden clasificarse según su propósito o la tecnología empleada para la construcción. Los diferentes tipos de techos verdes se muestran a continuación:

2.2.1 Según el espesor del sustrato o medio de crecimiento:

Techos verdes extensivos: Son aquellos con un espesor del sustrato de máximo 100 mm. Son de bajo peso, tienen poca diversidad de plantas. Entre las más comunes se encuentran las plantas "suculentas"² y otros tipos de plantas resistentes a temperaturas extremas, vientos fuertes y a las condiciones de humedad del lugar. Son los que tienen menor costo y requieren menos mantenimiento, además de muy poca o ninguna irrigación (Lanarc Consultants Ltd., Kerr Wood Leidal Associates Ltd., et al., 2005; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Techos verdes intensivos: Se caracterizan por tener un sustrato profundo, de mínimo 200 mm de espesor, requieren mantenimiento e irrigación frecuente, están diseñados para la siembra intensiva de vegetación, son aptos para el desarrollo de gran diversidad de plantas, tienen buenas propiedades de aislamiento, pueden ser estéticamente atractivos, tienen alta eficiencia energética y buena capacidad de retención de escorrentía, sin embargo generan grandes cargas en las edificaciones y su costo de construcción y mantenimiento suele ser alto (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Techos verdes semi intensivos: Pueden tener características tanto de los techos verdes intensivos, como de los extensivos. El espesor del sustrato se encuentra entre los 100 mm y los 200 mm, por lo cual se puede desarrollar en ellos vegetación más variada que la de los techos extensivos, por ejemplo arbustos. El mantenimiento y la irrigación en este caso dependen del tipo de vegetación que le sea instalada (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

2.2.2 Según su propósito:

Techos verdes biodiversos o ecológicos especializados: Este tipo de cubierta está diseñado con el fin de replicar en ella un paisaje que se conecte con la estructura ecológica principal de la región, y que constituya un nuevo hábitat para la flora y la fauna local. Dentro de esta categoría se encuentran los llamados techos marrones, que son una versión sin vegetación, en la cual el sustrato se selecciona especialmente para permitir el crecimiento de especies vegetales autóctonas (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

² Las plantas suculentas o crasas son aquellas en las que la raíz, el tallo o las hojas se han engrosado para permitir el almacenamiento de agua en cantidades mucho mayores que en las plantas normales (http://es.wikipedia.org/wiki/Planta_suculenta)

Techos transitables o ajardinados: Son aquellos diseñados para ser transitados, generalmente para uso recreativo o de contemplación. Estos espacios generalmente se encuentran dotados con mobiliario y pisos transitables, y la vegetación que se selecciona para ellos es de tipo ornamental (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Techos verdes Huerta: El propósito de estos techos es la producción agrícola. En este tipo de cubiertas deben designarse áreas para la plantación y espacios de circulación, se debe garantizar un sistema de riego preferiblemente reciclando el agua lluvia captada por el mismo techo. Se puede realizar la siembra en bandejas y otros elementos para facilitar la manipulación y proteger mecánicamente la capa de impermeabilización (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Techos verdes autorregulados: Tienen como propósito lograr las condiciones óptimas para mantener la cobertura vegetal, con el mínimo de materiales, inversión económica y peso posibles. Lo ideal es que este tipo de techos logren mantener su vitalidad sin requerimientos de riego adicional y mantenimiento frecuente, ya que no están diseñados para ser transitados (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

2.2.3 Según la tecnología de construcción empleada:

De acuerdo con la Secretaría Distrital de Ambiente (2011) en la guía de techos verdes para Bogotá, los techos verdes según la tecnología de vegetalización se pueden clasificar en:

Tipo multicapa monolítico: Esta es la tecnología más común, que consiste en apoyar sobre la cubierta impermeabilizada las diferentes capas de componentes de forma continua.

Tipo multicapa elevados: En este caso las diferentes capas que conforman el techo verde se apoyan sobre pedestales, separándolas de la cubierta de la edificación.

Tipo receptáculo: Se apoyan sobre la cubierta impermeabilizada una serie de recipientes independientes que alojan el medio de crecimiento y la vegetación.

Tipo monocapa: Son tapetes presembrados que se incorporan en una sola capa. Se debe fijar a la cubierta previamente impermeabilizada.

Aeropónicos: Este tipo de sistemas carece de medio de crecimiento, por lo cual se requiere de un sistema de soporte de la vegetación, y la nutrición se realiza por medio de irrigación directa a las raíces expuestas de las plantas.

3 Políticas e incentivos a nivel nacional e internacional para la instalación de techos verdes

Gobiernos de diferentes ciudades alrededor del mundo han desarrollado e implementado políticas con el fin de promover la construcción de techos verdes en edificaciones con diferentes usos. Las que se exponen a continuación, se seleccionaron a partir de una búsqueda en internet, con el objetivo de abarcar diferentes regiones del mundo, diferentes niveles de desarrollo y diferentes tipos de incentivos.

Adelaida (Australia): Se instituyó un plan a 30 años, que busca proveer a la ciudad de formas apropiadas de edificación que susciten la creación de un nuevo espacio urbano, más compacto y eficiente. El diseño de las nuevas formas urbanas debe incluir las innovaciones líderes en el mundo a nivel de sustentabilidad y eficiencia energética e hidráulica, con el fin de asegurar que las edificaciones y el espacio público sean habitables ante las altas temperaturas, consecuencia del cambio climático. Un buen diseño urbano, debe estar conformado por espacios abiertos, vinculados por vías verdes, calles arborizadas, y techos y paredes verdes, que contribuyen al atractivo y la vitalidad del sector (Department of Planning of South Australia, 2010).

Las políticas establecidas en el plan, relacionadas con la implementación de techos verdes son:

- Establecer una comisión que asesore el diseño integrado del ambiente construido, incluyendo un grupo de arquitectos del gobierno para conformar un equipo multidisciplinario.
- Establecer, por medio del control de planeación, estándares muy altos para el desarrollo urbano y el diseño de común acuerdo con la comisión de diseño integrado.
- Estructurar planes para la implantación de desarrollos verdes, que establezcan los objetivos y lineamientos para lograr el alto rendimiento de las edificaciones en términos de respuesta climática, uso de energía, uso y reciclaje de aguas, calidad del aire y mitigación del ruido y mejoramiento de la estética del espacio público.
- Se debe asegurar que el diseño de la edificación pueda adaptarse en un futuro para minimizar los requerimientos de nuevas edificaciones y maximizar la reutilización y el perfeccionamiento de la infraestructura existente.

Sídney (Australia): La ciudad de Sídney ha establecido unos objetivos, que han sido desarrollados en compañía de la comunidad, y se encuentran basados en las buenas prácticas, ciencia y política. Para el año 2030 la ciudad debe disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 50% con respecto a los niveles de 1990, y en 70% para el año 2015 (City of Sydney Local Government, 2010).

Para el año 2030 la ciudad debe tener la capacidad de cubrir el 100% de la demanda energética con la generación local de energía, y un 10% del suministro de agua debe realizarse por aguas captadas. Para este mismo año la movilidad en la ciudad debe ser preferiblemente peatonal o en bicicleta, y los espacios verdes en la ciudad deben encontrarse alrededor de 250 metros de distancia entre ellos (City of Sydney Local Government, 2010).

El Plan de Manejo Ambiental de la ciudad de Sídney fue aprobado por el consejo el 25 de junio de 2007. Éste establece la visión ambiental, los objetivos y las acciones que deben implementar el consejo y el gobierno del área local en cuanto a energía y emisiones, agua, desechos, plantas y animales.

Se establecieron 53 acciones diseñadas para reducir el impacto ambiental, dentro de las cuales se encuentra la construcción de techos verdes. En este respecto la ciudad debe fomentar los techos verdes en edificaciones, mediante proyectos de demostración, orientación y controles de planificación. En primera instancia se mostrarán las cubiertas ajardinadas en el área local y se elaborarán las directrices basadas en las mejores prácticas a nivel mundial. En Sídney solo se reconocen para los techos verdes los beneficios que tienen con respecto a la generación de hábitat, por esta razón, aunque la política fue planteada en el 2007 tiene una importancia media por lo que aun no se ha iniciado su ejecución (City of Sydney Local Government, 2007).

Montreal (Canadá): El fondo de eficiencia energética de Quebec implementó un programa de incentivos directos de aproximadamente \$54 dólares americanos por metro cuadrado de techo verde que se construya. La empresa encargada del suministro de gas, Gaz Metropolitan, era la encargada de la financiación. En Quebec la Agencia de edificaciones energéticas incrementó el valor del incentivo hacia el año 2006 (Lawlor, Currie, et al., 2006).

Montreal cuenta también con un plan maestro oficial que contempla la implementación de techos verdes para la consecución de dos de los objetivos planteados. El objetivo 12, consiste en promover la arquitectura de calidad, que sea ecológicamente racional y respetuosa con el carácter de Montreal. Dicha calidad debe alcanzarse a través de la construcción de edificios que respeten la escala humana, y cuyo estilo y relación con el entorno contribuyan a la comodidad de los peatones. La noción de calidad arquitectónica debe extenderse a las técnicas de construcción, mantenimiento y operación de edificios innovadores que son respetuosos con el medio ambiente (Lawlor, Currie, et al., 2006). La práctica de arquitectura ecológica está regida por diferentes normas, por ejemplo, para la construcción de edificios residenciales rigen los estándares expuestos en "NovoClimat", mientras que para estructuras no residenciales aplica la norma C-2000. El sistema LEED, desarrollado por Estados Unidos, ha sido adaptado por el consejo canadiense de

edificaciones verdes para ser usado con los códigos de construcción de Canadá y Quebec (Ville de Montreal, 2004). El otro objetivo del plan maestro de Montreal, que contempla los techos verdes como solución, es el Objetivo 17 que busca asegurar el manejo óptimo de los recursos en el contexto urbano, con la intención de mejorar la calidad del ambiente, con estrategias que permitan mejorar la calidad del aire, retener el agua lluvia, reducir la temperatura en el entorno urbano, entre otros beneficios de los SUDS. Las medidas para la implementación de los techos verdes, corresponden al fomento de su utilización en edificios comerciales, institucionales, industriales y municipales (Ville de Montreal, 2004).

Toronto (Canadá): Toronto fue una de las primeras ciudades de Norteamérica en implementar normatividad para la regulación de la construcción de techos verdes. El Estatuto para techos verdes fue adoptado en el año 2009, éste requiere y rige la construcción de techos verdes a partir del 31 de enero del año 2010 (City of Toronto, 2010).

Según el estatuto, los techos verdes son obligatorios para toda construcción nueva que tenga una superficie que supere los 2.000 metros cuadrados. Existe un requisito del grado de cobertura que varía entre 20 y 60% del espacio disponible del techo, dependiendo del tamaño de la edificación. Esta disposición excluye las cubiertas de edificaciones de tipo industrial, a las que se les asignó un requisito diferente, que entró en vigencia a partir de enero del año 2011, el cual consiste en construir techos verdes cuyo tamaño debe ser del 10% del espacio disponible del techo, hasta un máximo de 2.000 metros cuadrados. Es necesario aclarar que el espacio disponible del techo corresponde al área total, excluyendo las áreas designadas para las instalaciones de energía renovable, terrazas privadas y el espacio residencial al aire libre (City of Toronto, 2010).

Los techos de torres con un área de placa menor de 750 metros cuadrados y edificios residenciales de menos de seis pisos o 20 metros de altura están exentos. Pueden aplicarse variaciones en la extensión de techo verde a cambio de una retribución económica al gobierno. Donde las excepciones no son permitidas por el estatuto, éstas deben ser reportadas al Consejo de la ciudad y se debe realizar una retribución económica al gobierno (City of Toronto, 2010).

El estatuto de techos verdes de Toronto establece los requerimientos mínimos y los diferentes parámetros, para la construcción y el mantenimiento de techos verdes, y a la vez es congruente con los requerimientos del código de construcción de Ontario. Para la construcción de techos verdes en Toronto se requiere una licencia (City of Toronto, 2010).

Toronto también cuenta con un programa de incentivos, llamado "The Eco-Roof incentive Program". Los proyectos de techos verdes que resulten elegibles recibirán desde \$50

dólares por metro cuadrado de techo verde construido hasta un máximo de \$100.000 dólares (City of Toronto, 2011).

Los beneficiarios de la financiación se seleccionarán con base en los siguientes criterios:

1. Todos los edificios comerciales, industriales e institucionales existentes localizados en la Ciudad de Toronto son elegibles.
2. Un techo verde en una edificación industrial con un área superficial de 2000 metros cuadrados o superior es elegible.
3. Un techo verde en una edificación institucional o comercial con un área superficial de 2000 metros cuadrados o inferior es elegible.
4. Se otorgara prioridad a la selección de edificios ubicados en áreas donde el efecto isla de calor urbana y el manejo de la escorrentía superficial son de especial preocupación.
5. El techo verde debe tener una cobertura continua del medio de crecimiento de por lo menos un 50% de la primera planta del edificio, y estar diseñado y construido de acuerdo con los requerimientos de los estándares constructivos de techos verdes de Toronto. Los techos verdes cuya construcción se ha completado no pueden aplicar para el plan de incentivos, solo aplican techos verdes que estén en proceso de diseño y construcción (City of Toronto, 2011).

Vancouver (Canadá): En Vancouver las edificaciones aportaban el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2008, por lo que se implementó un plan de acción llamado "Greenest City 2020 Action Plan", el cual en su capítulo de edificaciones verdes enumera las siguientes acciones como prioritarias (City of Vancouver, 2009):

1. Actualizar los estatutos de construcción de Vancouver para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero tanto en edificaciones nuevas como en construidas.
2. Desarrollar y promover herramientas financieras que permitan el desempeño energético eficiente llenando algunos de los vacíos entre la ocurrencia de la inversión y el alcance del ahorro propuesto.
3. Dar a conocer al público en general las tarifas para la solicitud de permisos para nuevas construcciones, así como renovaciones a edificaciones existentes, con el fin de recompensar la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y el comportamiento eficientemente energético de las edificaciones.

Las estrategias que se implementarán en Vancouver para lograr los objetivos propuestos para el año 2020 son (City of Vancouver, 2009):

Regulación: La ciudad debe desarrollar una política que sea sencilla y que plantee requerimientos coherentes y previsibles, con el fin de reducir la incertidumbre para los constructores y otros involucrados en el mercado.

Herramientas de financiación a edificaciones verdes existentes: La cual debe proporcionar los medios para abordar los problemas de accesibilidad y equidad e incrementar el ritmo del cambio hacia el desarrollo verde y reacondicionamiento. Un ejemplo de esto es el programa "Home Energy Loan" que provee financiación a los propietarios para hacer actualizaciones con el fin de lograr un consumo eficiente de energía.

La ciudad debe crear asociaciones que aseguren que hay suficientes trabajadores calificados para satisfacer las necesidades de un sector de la construcción con un rápido crecimiento verde. Las acciones van desde el continuo liderazgo en la construcción de instalaciones suministradas por la ciudad, a la distribución de las guías de renovación para casas verdes y herramientas de diseño pasivo.

A partir de Julio de 2010, todas las nuevas edificaciones que han sido rezonificadas en Vancouver están obligadas a obtener la certificación LEED Gold para la industria de la construcción, por su desempeño ambiental (City of Vancouver, 2009).

Chicago (EE.UU): En el año 2005 Chicago implementó un programa de incentivos que contribuyó a la realización de 20 proyectos de techos verdes. Con base en este éxito, el departamento de ambiente realizó grandes donaciones para colaborar con la construcción de techos verdes en edificaciones residenciales y comerciales pequeñas. Las donaciones que superaban los cinco mil dólares se otorgaron a cuarenta proyectos seleccionados y se extendieron hasta el año 2007 respaldando doce proyectos más. Sin embargo actualmente la ciudad de Chicago no acepta la aplicación de más donaciones (City of Chicago, 2010).

Actualmente en la Ciudad de Chicago se desarrolla el "Chicago climate action plan", el cual contempla cinco estrategias para disminuir los efectos del cambio climático. La primera estrategia corresponde a la construcción de edificios eficientes en el uso de energía, la segunda es la utilización de fuentes de energía limpia y renovable, la tercera considera mejores opciones de transporte, la cuarta se refiere a la reducción de residuos y contaminación industrial, y por último la adaptación. Para ejecutar la primera estrategia se plantean las acciones que se enumeran a continuación (City of Chicago, 2008):

1. Acondicionar los edificios comerciales e industriales.
2. Acondicionar los edificios residenciales.
3. Cambiar electrodomésticos viejos por nuevos.
4. Promover la disminución del consumo de agua.
5. Actualizar el código de conservación de energía de la ciudad.
6. Establecer nuevas pautas para las renovaciones.
7. Refrescar con árboles y techos verdes.

8. Seguir iniciativas sencillas como apagar luces y electrodomésticos cuando no estén en uso, cerrar la llave de agua mientras se enjabona, entre otros.

El programa ofrece a ciudadanos y propietarios de edificios privados acceso a financiación para acondicionar edificios, con el fin de generar un ahorro en el consumo de energía del 20% al 50%. También ofrece subsidios y asistencia técnica, para el reacondicionamiento y la construcción de edificaciones, con el fin de garantizar que sean edificios eficientes en el uso de energía (City of Chicago, 2008).

El plan de Chicago propone para el año 2020 la construcción de siete millones de metros cuadrados de techos verdes nuevos, sin incluir en esta cifra los 400 edificios con techo verde terminado o en construcción que tiene actualmente la ciudad. El plan también plantea que el simplificar y alinear el Código de conservación de la energía de Chicago con los últimos estándares internacionales podría ayudar a reducir las emisiones, al igual que podrían disminuirse al exigir renovaciones en los edificios comerciales y residenciales existentes para cumplir con los estándares aceptados en la industria de la edificación ecológica (City of Chicago, 2008).

Nueva York (EE.UU): En Nueva York se implementa el Plan NYC a partir del año 2007. Uno de los principales objetivos del Plan es reducir el impacto que tienen las edificaciones en el consumo de electricidad, que corresponde a un 94% del total consumido en la ciudad, y en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero, ya que las edificaciones aportan un 75% de los gases emitidos por la ciudad (City of New York, 2011).

Las iniciativas del Plan para la construcción de edificios verdes son: Incrementar la sostenibilidad de las viviendas públicas financiadas por la ciudad, preservar y actualizar la vivienda de forma asequible, apoyar la conectividad ecológica, incorporar sostenibilidad a través del diseño y el mantenimiento de todo el espacio público, construir proyectos públicos de infraestructura verde, informar e involucrar a las comunidades en manejo sostenible del agua de escorrentía, modificar los códigos para incrementar la captura de aguas pluviales, proveer incentivos por infraestructuras verdes, incrementar la eficiencia operacional con nuevas tecnologías, mejorar los códigos y reglamentos para mejorar la sostenibilidad de las edificaciones, mejorar la eficiencia energética en edificaciones históricas, entre otras (City of New York, 2011).

Nueva York cuenta con un programa de incentivos, que consiste en la disminución de impuestos durante un año. Los impuestos tienen un descuento de \$ 4.5 dólares por pie cuadrado de techo verde, hasta un tope máximo de \$100.000 dólares o la totalidad del impuesto del edificio (la menor de éstas). Para que los techos verdes puedan aspirar al incentivo deben cumplir con las siguientes condiciones (City of New York, 2010):

1. La construcción debe haber empezado después del 5 de agosto de 2008.
2. Al menos el 50% del espacio debe estar cubierto por el techo verde.

3. La capa vegetal debe cubrir en un 80% el área del techo verde, con plantas como sedums u otras resistentes a la sequía. El 80% mencionado hace referencia a la separación de las plantas.
4. Un profesional registrado y con licencia expedida en Nueva York ya sea arquitecto, ingeniero, arquitecto paisajista u horticultor, con título de una institución acreditada, debe certificar la capa vegetal.
5. La membrana impermeabilizante y la de aislamiento deben cumplir con los códigos de construcción y los códigos contra fuego.
6. Deben tener una capa anti raíces.
7. La capa de drenaje debe diseñarse de forma tal que los drenes puedan ser inspeccionados y limpiados.
8. El sustrato debe tener al menos dos pulgadas de espesor.
9. Si el espesor del sustrato es menor de tres pulgadas, debe diseñarse una capa de retención independiente para evitar que el sustrato se seque rápidamente, a menos que se certifique que el techo verde no requiere irrigación regular para mantener vivas las plantas.

Se debe presentar un plan de mantenimiento que incluya inspecciones semestrales, planes para reemplazar la vegetación e inspección mensual a los drenajes. Se debe garantizar el mantenimiento por un mínimo de cuatro años después de que la reducción de impuestos es concedida (City of New York, 2010).

Singapur: Las cubiertas ajardinadas han sido implementadas en Singapur en varias edificaciones, incluyendo las cubiertas de la Junta de Vivienda y Desarrollo de Singapur (HBD). La meta actual es adicionar 30 hectáreas de techos verdes para el año 2020 y 50 hectáreas para el año 2030, a través de las siguientes iniciativas (Singapore Ministry of the Environment and Water Resources and Singapore Ministry of National Development, 2009):

1. HBD se hará cargo del desarrollo de nueve hectáreas de techos verdes en las cubiertas de los edificios de parqueaderos ubicados en las zonas residenciales, durante los próximos tres años.
2. El gobierno incentivará el desarrollo de techos verdes en puntos estratégicos de la ciudad. La Junta de Parques Nacionales liderará un plan de subsidios, para cofinanciar hasta la mitad del costo de la construcción de los techos verdes centrándose en el Centro Distrital de Negocios y en las áreas de Orchard Road para empezar. La Autoridad de Redesarrollo Urbano (URA) otorgará a los edificios ubicados dentro de los corredores de mayor actividad en el área central una bonificación por área de superficie bruta que se utilice para áreas de cubierta al aire libre, si los desarrolladores ofrecen implementar techos verdes en sus proyectos.
3. URA adoptará una política de sustitución del paisaje para incluir la vegetación en los nuevos desarrollos, con el fin de desarrollar e intensificar el uso de la tierra en la

ciudad y en las nuevas áreas de crecimiento. Todos los nuevos desarrollos en el centro y zonas aledañas a él tendrán que proporcionar sectores de paisajes equivalentes al área de desarrollo del proyecto en general, en forma de zonas verdes, en zonas elevadas y a nivel del suelo.

Tokio (Japón): Desde el año 2007 Tokio inició la implementación de un plan a diez años, que contempla cuatro políticas para recuperar el espacio verde perdido. La primera política es la creación de un movimiento verde liderado por los residentes de la ciudad de Tokio y los empresarios, la segunda es mejorar la red verde duplicando los árboles en las vías, la tercera política consiste en establecer centros comunitarios verdes para el uso de proyectos escolares de siembra intensiva, y por último, la cuarta política es usar el ingenio para crear y conservar espacios verdes. Dentro de esta última política se encuentra contemplado el desarrollo de techos verdes (Tokyo Metropolitan Government, 2007).

La política mencionada contempla la construcción de 400 hectáreas de espacios verdes, entre techos verdes, muros verdes, lotes de parqueo, áreas verdes aledañas a vías férreas, entre otros. Según lo expuesto, para edificaciones en construcción o renovación, es necesario elaborar un plan de transformación, que al operarse simultáneamente con las directrices para la creación de zonas verdes en el espacio público no utilizado formuladas por el Gobierno Metropolitano de Tokio, garantizará el buen diseño, la continuidad y la conexión con el paisaje urbano circundante (Tokyo Metropolitan Government, 2007).

El gobierno Metropolitano de Tokio será el encargado de fomentar la plantación de vegetación en los espacios de oficinas, escuelas, hospitales, en áreas adyacentes a los caminos, áreas de ferrocarril y estacionamiento. También establecerá directrices para la introducción al ahorro de energía y energía renovable, que sean consistentes con otras consideraciones ambientales, que tienen en cuenta la estructura de la edificación para crear un espacio verde más atractivo (Tokyo Metropolitan Government, 2007).

Además se propone optimizar el uso de los propios recursos para promover de manera activa la sensibilización ambiental y fomentar las iniciativas de las empresas privadas mediante la publicación de programas modelo para las empresas, la introducción de tecnologías verdes de vanguardia y la realización de eventos para el contacto entre empresas (Tokyo Metropolitan Government, 2007). En la ciudad se han instituido políticas que requieren la instalación de techos verdes en el 20% de las edificaciones nuevas para edificios del gobierno y de un 10% para edificaciones privadas (Livingroofs.org Ltd., 2012).

El plan de Tokio plantea desarrollar un sistema de calificación que certifique el cumplimiento de las metas verdes propuestas en el plan verde diseñado para cada edificación, además propone ajustar dichos planes de acuerdo con el Estatuto de Conservación Natural de Tokio, y también planea generar un sistema de incentivos,

mediante la reducción de impuestos aquellas edificaciones que obtengan cierta puntuación (Tokyo Metropolitan Government, 2007).

Basilea (Suiza): En Basilea Suiza la reglamentación para la implementación de techos verdes en la ciudad exige que todos los techos planos deberán sustituir el hábitat afectado con la instalación de un techo verde. Se requiere que el material que se use como sustrato debe ser un suelo de la región, adecuado con humus, tierra vegetal y la estructura de transición entre el sustrato y la capa de filtro debe ser de material granular con una baja proporción de arcillas. La capa de suelo debe tener un espesor mínimo de 8 cm, sin embargo para generar diversidad de hábitat y un medio adecuado para el desarrollo de animales de tierra como lombrices el espesor debe ser al menos de 15 cm. En el caso de áreas de menor extensión en donde las condiciones estructurales de la edificación no sean óptimas para soportar las cargas, el espesor puede ser de 6 cm o se pueden instalar techos verdes en varios módulos pequeños. Se recomienda instalar suelos provistos por una empresa horticultora (Departamento de Construcción Ciudad de Basilea, 2012).

La Ley de Protección del Patrimonio Natural y Cultural exige especialmente el uso de suelos de la región para prevenir la extinción de especies que se adaptan a las condiciones específicas del suelo regional. Las directrices de techos verdes en Basilea, establecen también los métodos de transporte, elevación, almacenamiento y disposición de los suelos que se van a instalar, hace unas recomendaciones para evitar la proliferación de maleza, lo que haría más costoso el mantenimiento del techo verde (Departamento de Construcción Ciudad de Basilea, 2012).

Stuttgart (Alemania): La ciudad de Stuttgart en Alemania ha sido líder en la implementación de políticas promoviendo y exigiendo la implementación de techos verdes desde 1986. El marco jurídico fue Establecido en la ley Federal de Protección de la Naturaleza y en los Códigos Federales de Construcción. Sin embargo en Stuttgart se han implementado políticas regulatorias, combinados con sistemas de incentivos, conocidas como políticas mixtas. Estas políticas son (International Green Roof Association, 2010):

1. Subsidios financieros directos otorgados por el gobierno, como una garantía para la puesta en marcha del proyecto. La garantía tiene un valor de 10 a 20 euros por metro cuadrado de techo verde y motiva a algunos propietarios de edificaciones comerciales o privadas a instalar voluntariamente techos verdes. Los subsidios se otorgan a proyectos de valor agregado, no pueden ser entregados a techos verdes que sean requeridos como condición de construcción. En los últimos años la financiación de los techos verdes ha venido de fuentes estatales para reducir las emisiones de carbono y el consumo de energía. El personal de la ciudad ofrece consultas gratuitas para el desarrollo de techos verdes.

2. Se otorgará un descuento en las tarifas de alcantarillado a todos aquellos que instalen techos verdes. Dependiendo de la tarifa vigente el ahorro puede ser de un euro por metro cuadrado de techo verde.
3. La Ley Federal de Protección de la Naturaleza establece disposiciones para la compensación ecológica, que requieren que los valores ambientales perdidos por el desarrollo sean reemplazados por nuevos espacios verdes. Los techos verdes son la opción más económica y que tiene una mayor proximidad con el estado ambiental original.
4. La normatividad local de Stuttgart exige la instalación de techos verdes donde sea técnicamente viable, que en la mayoría de casos implica techos con una inclinación menor a 20 grados. Estos requisitos se aplican tanto al desarrollo de nuevas edificaciones como a las zonas de planificación urbana. Las disposiciones para las nuevas áreas exigen que éstas tengan más de 1.5 millones de metros cuadrados de techos verdes.

Londres (Inglaterra): En el año 2009 Londres implementó un programa llamado "conduciendo a una Londres más verde", que proponía la implantación de un portafolio de acciones para la instalación de techos y muros verdes en los principales desarrollos nuevos, y la preparación de un proyecto para generar un fondo para subsidiar los techos verdes tanto en edificaciones nuevas como en las existentes. Se priorizarán los subsidios en zonas de alto riesgo de inundaciones y en las que requieren modificaciones en la temperatura. La alcaldía de Londres trabajará para fomentar la implementación de techos y jardines verdes en los edificios emblemáticos de la ciudad (Greater London Authority, 2009).

En el año 2011 se desarrolló el plan de Londres, que en su política 5.11 hace referencia a los techos verdes y el desarrollo de los alrededores. Esta política indica que deben realizarse propuestas para la implementación de techos y paredes verdes, siempre que sea posible para desarrollar la mayor cantidad de los siguientes objetivos (Greater London Authority, 2011):

1. Adaptación al cambio climático (Incluyendo disminución en la temperatura).
2. Drenaje urbano sustentable.
3. Mitigación del cambio climático (incluyendo eficiencia energética).
4. Mejoramiento de la biodiversidad.
5. Espacios de cubiertas accesibles.
6. Mejoramiento de la apariencia y la resistencia de la edificación
7. Cultivo de comestibles.

Los municipios deben desarrollar políticas más detalladas y propuestas para apoyar la implementación de techos verdes y el reverdecimiento de los sitios en desarrollo, además

se debe promover el uso de techos verdes en pequeños desarrollos, renovaciones y remodelaciones cuando sea factible (Greater London Authority, 2011).

El proyecto de adaptación al cambio climático de Londres establece que el alcalde deberá trabajar con sus aliados para posibilitar la entrega de cien mil metros cuadrados de techos verdes para el año 2012 y se deberá incrementar el verde en la ciudad en un 10%. Para los nuevos desarrollos principales, ubicados en zonas centrales de alta actividad, se deben tener techos verdes, de lo contrario deben tener "techos fríos"³ (Greater London Authority, 2010).

En el año 2011 Green Roof Organisation (GRO) publicó el Código de techos verdes, donde se establecen las especificaciones técnicas y los parámetros para el diseño, la construcción y el mantenimiento, y reúne la documentación complementaria que pueda requerirse (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Copenhague (Dinamarca): La ciudad de Copenhague tiene una meta clara en su plan climático, que consiste en la reducción de las emisiones de carbono en un 20% en el periodo contemplado entre el año 2005 y 2015. Para el año 2025 Copenhague planea ser la primera capital neutra en emisiones de carbono. Tanto los nuevos edificios, como los renovados deben ser verdes, es decir deben tener un consumo mínimo de energía para lo cual pueden contar con sistemas de techos y fachadas verdes, entre otras técnicas de construcción sostenible (Bjerregaard, Bondam, et al., 2009).

El ayuntamiento de Copenhague plantea que se logrará una reducción de 1% en las emisiones a partir del desarrollo del espacio urbano, para lo cual se han diseñado cuatro iniciativas concretas: La primera consiste en fomentar una ciudad compacta, con menor necesidad de transporte, la segunda es tener en cuenta el clima en la planificación sostenible de todos los proyectos de desarrollo urbano, la tercera iniciativa consiste en designar como zona de energía controlada a toda nueva área urbana, con el fin de que toda instalación pertenezca a la clase de consumo mínimo de energía, por último el ayuntamiento vigilará que el requisito de eficiencia energética se cumpla (Bjerregaard, Bondam, et al., 2009).

³ un techo frío es un sistema de cubiertas que: 1) Ofrece alta reflectancia solar (la capacidad para reflejar la radiación solar visible, infrarrojo y longitudes de onda ultravioleta del sol, reduciendo la transferencia de calor hacia el edificio) y 2) Es de alta emisión térmica (la capacidad de radiación de un alto porcentaje de la energía solar absorbida o no reflejada).(http://es.wikipedia.org/wiki/Techo_frío)

El plan de Copenhague contempla la construcción de techos verdes como un mecanismo para la adaptación de la ciudad al cambio climático, ya que gracias a su capacidad de retener el agua, ayudan a prevenir inundaciones (Bjerregaard, Bondam, et al., 2009). La administración de la ciudad implementó una política que consiste en instalar techos verdes en aquellas cubiertas que tienen una pendiente menor o igual a 30°, tanto en edificaciones nuevas en como las que se encuentran en procesos de construcción, remodelación o renovación. Las edificaciones nuevas y las que están atravesando por procesos de adecuación deben instalar cubiertas que cumplan con el requisito para la instalación de techos verdes. La política establece que los techos verdes deben cumplir al menos con dos de los siguientes requerimientos (City of Copenhagen, 2010):

1. Deben captar entre el 50% y el 80% de la precipitación que cae en el techo.
2. Proporcionar un efecto de refrigeración y aislamiento a la edificación y reducir la reflexión.
3. Ayudar a hacer la ciudad más verde, reduciendo el efecto isla de calor, contrarrestando el incremento de la temperatura en la ciudad.
4. Contribuir a la variación de la estética arquitectónica y la visual, generando un efecto positivo en la calidad de vida de las personas.
5. Duplicar la vida útil de la cubierta, protegiéndola de los rayos UV.

Los techos verdes pueden obviarse si el costo tiene un impacto negativo significativo en el presupuesto del proyecto (City of Copenhagen, 2010).

Ciudad de México (México): Se instituyó La Agenda Ambiental de Ciudad de México, 2007- 2012, en la cual uno de los principales proyectos es aumentar la superficie de techos verdes en edificios públicos de la ciudad a treinta mil metros cuadrados para el año 2012. Dentro de la agenda se estableció el programa de conservación y restauración de áreas verdes Urbanas, en el que se destacan dos puntos que hacen referencia a los techos verdes (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2007).

El numeral "g", consiste en una propuesta para la creación de la norma ambiental para el Distrito Federal, que establezca los lineamientos para la instalación de sistemas de techos verdes. La norma debía exigir que las nuevas edificaciones establezcan áreas verdes en sus cubiertas, con el fin de disminuir en primera instancia los efectos del calentamiento global (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2007). En diciembre 24 de 2008 se estableció la norma NADF-013-RNAT-2007, la cual establece que *"Las personas que deseen instalar sistemas de naturación deberán presentar el proyecto ejecutivo para aprobación ante la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal previo a que se inicien los trabajos; para lo cual deberán tomar en cuenta estos lineamientos y especificaciones técnicas, respetando siempre el medio ambiente bajo criterios de sustentabilidad desde los procesos de fabricación de materiales para la naturación hasta el*

reciclado de los mismos cuando queden en desuso” (Órgano del Gobierno del Distrito Federal, 2008).

El numeral “h” consiste en la implantación de treinta mil metros cuadrados por año de techos verdes en inmuebles del Gobierno del Distrito Federal. En la ejecución de este proyecto intervendrá la Dirección General de Bosques Urbanos y Educación Ambiental, a través de la Dirección de Reforestación Urbana, Parques y Ciclovías (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, 2007).

Actualmente la Secretaría de Ambiente, en coordinación con la Secretaría de Finanzas de Ciudad de México, otorgan un beneficio fiscal, que consiste en la reducción de un 10% en el valor del impuesto predial a las personas que acrediten ser propietarias de inmuebles destinados al uso residencial, que instalen voluntariamente un sistema de techos verdes en las cubiertas de sus viviendas. Para obtener dicho beneficio, los techos verdes deben cumplir con las especificaciones técnicas, requisitos, condiciones, parámetros y criterios mínimos de calidad de conformidad con lo establecido en la Norma Ambiental 013 emitida por la Secretaría de Medio Ambiente, y ocupar una tercera parte del total de la superficie de la cubierta (Órgano del Gobierno del Distrito Federal, 2008). Además de lo anterior para acceder al descuento, el sistema de techo verde debe estar acreditado con la constancia de preservación ambiental, expedida por la Secretaría de Medio Ambiente (Asamblea Legislativa del Distrito Federal V Legislatura, 2010).

Buenos Aires (Argentina): En Buenos Aires se planteó el Programa de Cubiertas Verdes en Edificios Públicos, que tiene como objetivos principales mejorar la administración de los recursos, mejorar la calidad de vida de los habitantes y disminuir el impacto ambiental. Mediante la resolución N° 175-APRA/10 se inició la implementación del programa, y se determinó que la Agencia de Protección Ambiental será la encargada de establecer las acciones que conduzcan a la instalación de techos verdes en edificaciones públicas (Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires 2010 a).

En la mencionada resolución, también se especifica que se debe acordar una cooperación, y una asistencia financiera y técnica con las entidades privadas que estén dispuestas a financiar la instalación y/o el mantenimiento, de las cubiertas en edificaciones pertenecientes al gobierno como escuelas y hospitales. En ellas se debe garantizar que los beneficios que aporten los techos verdes tengan un impacto sobre el usuario de la edificación. La adhesión al programa es de carácter voluntario (Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires 2010 a).

Los instrumentos de promoción para los techos verdes no han sido institucionalizados aun en Buenos aires, sin embargo el Manual de Construcción Sustentable, del Gris al Verde,

plantea las siguientes alternativas de promoción (Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires 2010 b):

1. Modificaciones en el código de edificación: inclusión de un artículo donde se establezcan los parámetros de construcción de techos verdes, establecimiento de incentivos o contribuciones, como exenciones de impuestos en edificaciones comerciales e industriales, reducción del pago de contribuciones al alumbrado público y otros, por un tiempo determinado, y exención del pago del derecho a la construcción sobre la superficie del techo verde y/o un porcentaje de la superficie construible. Si después de haber accedido al beneficio no cumplen con la construcción de la cubierta, deberán devolver el valor descontado, y pagar una multa del 100% del valor del beneficio.
2. Modificaciones en el código de planeamiento: se plantea un cambio de usos del suelo, en el que se sustituyan solados secos por zonas verdes, se otorgará permiso para sustituir cubiertas a dos aguas por cubiertas planas.
3. Elaboración de la legislación, ya sea para cumplimiento o para promoción de los techos verdes.
4. Incentivos financieros: subsidios hasta del 50% del valor del techo verde a propietarios de inmuebles privados, o acceso a créditos con el Banco de Buenos Aires.

Bogotá (Colombia): La implantación de techos verdes está regida por el acuerdo 418 de 2009, el cual determina que la Administración Distrital es la encargada de promover el urbanismo sostenible, mediante *“el conocimiento, la divulgación e implementación progresiva de terrazas verdes entre otras tecnologías, en los proyectos inmobiliarios públicos de carácter distrital y privados nuevos o existentes de la ciudad”*. También exige que todo proyecto de infraestructura que sea desarrollado por entidades públicas deba contemplar en sus diseños la implementación de techos verdes (Concejo de Bogotá, D. C., 2009).

La Tabla 1 resume las políticas descritas anteriormente y muestra en qué ciudades se han implementado.

Tabla 1. Políticas implementadas alrededor del mundo, para la promoción de los techos verdes

<i>Políticas</i>	<i>Ciudad</i>															
	<i>Adelaida</i>	<i>Sídney</i>	<i>Montreal</i>	<i>Toronto</i>	<i>Vancouver</i>	<i>Chicago</i>	<i>Nueva York</i>	<i>Singapur</i>	<i>Tokio</i>	<i>Basilea</i>	<i>Stuttgart</i>	<i>Londres</i>	<i>Copenhague</i>	<i>Ciudad de México</i>	<i>Buenos Aires</i>	<i>Bogotá</i>
Plan de desarrollo local	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓		
Obligatoriedad de la instalación				✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓			
Adecuación de la planeación	✓	✓									✓					
Organización de comités o asociaciones	✓				✓				✓							
Modificación de estatutos o códigos					✓	✓	✓							✓		
Instalación en edificaciones Públicas			✓			✓	✓	✓				✓		✓	✓	✓
Techos demostrativos		✓														
Sistemas de Calificación			✓		✓			✓								
Subsidios o financiación					✓	✓		✓				✓				
Medidas compensatorias								✓		✓	✓					
Asesoría gratuita	✓	✓				✓										
Incentivos Directos			✓	✓	✓			✓								
Incentivos indirectos							✓	✓		✓			✓			

En las ciudades de Europa y Asia está consolidada la implementación de techos verdes, debido a que las políticas regionales no solo fomentan, sino que también exigen la construcción de este tipo de tecnologías. Norteamérica se está acercando al nivel de desarrollo que tienen las ciudades Europeas en este campo, principalmente a través de la ciudad de Toronto que ha logrado avances significativos, gracias a los esfuerzos de la administración, y la efectividad de las políticas que se eligieron.

La implementación de las políticas sigue un proceso evolutivo que puede tener algunas variaciones de acuerdo con las necesidades de cada ciudad. Lo que se busca generalmente es llegar a establecer la obligatoriedad de la construcción de techos verdes, pero para garantizar el éxito de la política su desarrollo debe hacerse de manera gradual.

Como se observa en la Tabla 1. Políticas implementadas alrededor del mundo, para la promoción de los techos verdes el punto en común de la mayoría de regiones es la elaboración de un plan de acción a un tiempo determinado, se evidencia también que las que no tienen un plan es porque sus políticas ya han tenido resultados, o por lo contrario como en el caso de Buenos Aires y Bogotá, hasta ahora están iniciando el proceso.

El plan de acción de las ciudades es de gran importancia, ya que en él se plantean los objetivos, y se especifica la metodología que se va a implementar: debe ser una de las primeras medidas a tener en cuenta al momento de desarrollar una política. Es relevante también como medida para la promoción del desarrollo de techos verdes hacer que la comunidad conozca sus beneficios, por esta razón muchas ciudades los construyen en edificios públicos por cuenta del gobierno. Lo ideal es ir más allá del simple hecho de mostrar que existen, y que tienen beneficios, por esta razón ciudades como Sídney implementan techos verdes demostrativos, que son básicamente techos verdes construidos por el gobierno en edificaciones públicas, con la diferencia de que están constantemente monitoreados y son materia prima de investigaciones.

El paso siguiente suele ser motivar a la comunidad, principalmente a los gremios constructores, para que empiecen a utilizar techos verdes. Se identificó que la forma más común de hacerlo es a través de incentivos ya sean directos, es decir, se entrega cierta cantidad de dinero por metro cuadrado de techo verde construido, o indirectos como reducción en impuestos o en las tarifas de servicios públicos. Los programas de incentivos se reemplazan posteriormente por subsidios o por el acceso a planes de financiación.

Después de todo el proceso mencionado, algunos gobiernos empiezan a exigir el desarrollo de techos verdes en edificaciones de emblemáticas nuevas, se van adicionando con el tiempo otros tipos, hasta que finalmente se hace obligatorio para todo tipo de edificación nueva, y en algunos lugares se hace extensivo a estructuras que se encuentren en procesos de remodelaciones o readecuaciones. Se evidencia que aquellas ciudades que empiezan a implementar la obligatoriedad de la construcción de techos verdes disminuyen o suprimen los programas de incentivos.

No solo se trata de exigir cantidades de techos verdes. En cuanto a las políticas que determinan la calidad, generalmente se desarrollan guías o manuales de diseño, o incluso códigos de diseño como en el caso de Londres, para definir los parámetros técnicos de construcción de techos verdes. En Australia y Norteamérica se ha implementado con éxito el servicio de asesoría gratuita, ligados a la creación de comités o asociaciones que se encargan de prestar dicha asesoría, y que también realizan un control de calidad de la construcción. En algunas ciudades se establecen sistemas de calificación.

Las ciudades que están en proceso de expansión modifican la planeación de las áreas dispuestas para nuevos desarrollos, con el fin de exigir en ellos el desarrollo de edificios sostenibles, otras como México, Chicago, Nueva York y Vancouver, modifican los códigos y estatutos existentes, principalmente los códigos de construcción, para incluir en ellos especificaciones respecto a techos verdes.

En cuanto a las políticas de restitución ambiental, son medidas muy estrictas adoptadas generalmente por ciudades que tienen problemáticas considerables, como el caso de extinción de especies en Basilea.

4 Esquema arquitectónico

4.1 Factores que Condicionan el diseño arquitectónico

Para el desarrollo de techos verdes se deben considerar una serie de factores que condicionan el diseño arquitectónico de la edificación, como la pendiente de las cubiertas, el acceso, las condiciones de seguridad para las personas que ingresan a los techos, la protección contra el fuego y la generación del microclima (Lockett, 2009; Pascual, 2009).

Pendiente de la cubierta: Los techos verdes se pueden construir con cualquier inclinación o curvatura, sin embargo esto estará condicionado por el uso que se le dará a la cubierta. Si se planea como un elemento para retención de agua o como jardín transitable, el uso de pendientes fuertes no es indicado (Lockett, 2009; Pascual, 2009).

Se consideran cubiertas inclinadas aquellas que tienen más de 10° de inclinación. En este tipo de techos es necesario desviar las fuerzas de empuje que aumentan proporcionalmente con el grado de inclinación de la cubierta, también se requiere proteger el sustrato de la erosión y las plantas⁴ que se seleccionen deben ser acordes con la inclinación de la cubierta y la exposición, porque se pueden deformar (ZinCo Cubiertas Ecológicas S.L., 2007).

La pendiente máxima que puede tener un techo verde está dada por el coeficiente de fricción de los materiales que la componen y el ángulo de fricción interno del suelo del sustrato. Su valor máximo aproximado es de 30°, sin embargo en este caso se deben usar cintas, mallas, tirantes o durmientes de seguridad. Los materiales que se implementen en este caso son diferentes de los tradicionalmente empleados (Pascual, 2009).



Figura 2. Sistema de mallas para techos inclinados.

Fuente: Green Roofs Construction and Maintenance

Para lograr la inclinación de las cubiertas sin que se

⁴ Para cubiertas inclinadas se recomiendan plantas de cepellón plano, es decir plantas perennes como Sedums (ZinCo Cubiertas Ecológicas S.L., 2007).

deslice el sustrato, éste se dispone dentro de los compartimientos de una estructura similar a un panal de abejas o una red, anclada a la cubierta de la edificación, ver Figura 2. También se utilizan sistemas modulares unidos entre sí, que se anclan al punto más elevado de la cubierta inclinada (ZinCo Cubiertas Ecologicas S.L., 2007; Luckett, 2009).

Los techos que tengan una pendiente menor al 2% requieren de un drenaje especial, ya que de no ser así el sustrato permanecería saturado de manera continua (Lanarc Consultants Ltd., Kerr Wood Leidal Associates Ltd., et al., 2005).

El acceso: Por razones de seguridad, en caso de que la cubierta sea transitable, el acceso debe realizarse a través de puertas que comuniquen con un ático situado en la cubierta o con una zona adyacente al edificio. En edificaciones nuevas el acceso debe facilitar el ingreso a personas con discapacidad física, por lo cual debe cumplir con los lineamientos propuestos por el Americans with Disabilities Act (ADA) con respecto al umbral, ancho y la geometría de la puerta, así como debe contemplarse el uso de elevadores y rampas (Luckett, 2009).

Aunque la cubierta no se encuentre diseñada para tránsito de personas se debe garantizar el acceso para su construcción y mantenimiento, ya sea por medio de una escotilla de techo o por una puerta exterior. Si no hay ninguna de estas dos posibilidades de acceso se puede ingresar por un costado del edificio mediante una escalera lateral que debe encontrarse anclada a una superficie plana (Luckett, 2009).

Elementos de seguridad: Para las cubiertas habitables, se requiere la instalación de elementos que garanticen la seguridad de los visitantes, como cercas o barandas, antideslizante en los senderos destinados a la circulación, iluminación adecuada, protección de las instalaciones eléctricas, pasamanos en las escaleras. Se debe separar el área accesible, la destinada para los equipos y maquinaria que se instalan en la cubierta y se debe reservar un espacio para el almacenamiento de implementos, herramientas y materiales usados en el mantenimiento del techo verde (Luckett, 2009).

Los techos que no contemplan el ingreso de visitantes tienen que cumplir con las condiciones mínimas de seguridad para las personas que trabajan en la construcción y el mantenimiento, principalmente dentro de los tres metros anteriores al borde del techo. El requisito consiste en la implementación de protección contra caídas, su instalación resulta más económica y efectiva si se conciben desde el momento del diseño. Según la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) deben diseñarse puntos de anclaje que tengan la capacidad de soportar aproximadamente 2500 kg (5000 libras) por cada trabajador. Los trabajadores pueden anclarse directamente al punto, o extender líneas de vida que deben cumplir con las mismas condiciones de resistencia teniendo en cuenta el

número de trabajadores. Los techos que tienen parapetos de un metro superiores no requieren protección adicional (Lockett, 2009).

Consideraciones contra incendios: Se debe considerar una fuente cercana de suministro de agua, seleccionar plantas que no puedan incendiarse con facilidad, un sustrato de bajo contenido orgánico que actúe como barrera contra el fuego, o conectar el sistema de irrigación a una alarma contra incendios. Para controlar la expansión del fuego es necesario disponer alrededor del perímetro del techo, en los elementos protuberantes de la cubierta o cada 40 metros en cualquier dirección, una zona que actúe como cortafuegos. Esta zona puede estar hecha con gravilla, piedras o adoquines de hormigón dispuestos sobre la capa filtrante, y puede ser utilizada para la inspección periódica que requieren los techos verdes (Velazquez, 2005; Lanarc Consultants Ltd., Kerr Wood Leidal Associates Ltd., et al., 2005; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Pascual, 2009).

Microclima: Al momento de diseñar una edificación con techo verde se deben considerar factores como: orientación, asoleamiento, vientos, lluvia, sombras urbanas, temperaturas superficiales, humedad, contaminación ambiental, entre otros, teniendo en cuenta los efectos que tienen sobre las plantas y demás componentes de la cubierta. Los vientos son el factor primordial ya que afectan componentes del techo como la vegetación y la impermeabilización en caso de que quede expuesta (Pascual, 2009).

4.2 Efectos aislamiento térmico

La mayor parte de la energía solar que cae sobre las cubiertas de concreto, asfalto o cualquier superficie dura es irradiada nuevamente en forma de calor, lo cual genera un incremento de la temperatura tanto al exterior como al interior de la edificación (Callaghan, Peck, et al., 1999). Una solución a esta problemática son los techos verdes que son conocidos como una técnica pasiva de refrigeración y tienen esta propiedad debido a que ocasionan una pérdida de calor latente y el aumento de la reflectividad de la radiación solar (Castleton, Stovin, et al., 2010).

El calor que puede absorber un techo verde varía entre el 70% y el 90% en el verano, y la pérdida de calor que evita en el invierno es del 10% al 30%. Con su implementación la temperatura externa es mucho menor que la de techos de materiales duros, y la interna

se hace más estable y confortable debido al efecto de masa térmica⁵. La temperatura que se debe obtener al interior de la edificación para generar la sensación de confortabilidad está entre 21 y 27 °C (Castleton, Stovin, et al., 2010).

Después de la puesta de sol la temperatura ambiente del aire sobre la vegetación disminuye significativamente y lo sigue haciendo durante la noche. Adicionalmente, los techos verdes capturan menos calor que los convencionales, por lo que la influencia del calor emanado durante la noche hacia el interior de la edificación es mucho menor en este caso (Castleton, Stovin, et al., 2010).

Estudios han evaluado el comportamiento térmico de los diferentes componentes de los techos verdes por separado, y de su conjunto, y se ha determinado que la transferencia de calor depende de factores como la sombra de la vegetación y sus procesos fisiológicos, la densidad del suelo, el espesor del sustrato, su contenido de humedad y la temperatura (Barrio, 1998; Castleton, Stovin, et al., 2010).

La selección de la vegetación determinará el nivel de aislamiento térmico de la edificación, por lo cual se recomienda escoger plantas de follaje largo o que se desarrollen en sentido horizontal⁶, ya que su función esencial es la de generar sombra. Las plantas y el aire atrapado entre ellas, sufren una serie de reacciones que definen el comportamiento térmico de la capa vegetal. Dichos procesos son (Barrio, 1998):

- La absorción de la radiación solar por parte de las hojas.
- El intercambio de ondas radioactivas entre las hojas y el ambiente, las hojas y la superficie del suelo y entre las propias hojas.
- La transferencia de calor convectivo entre las hojas y el aire, entre ellas y entre la superficie del aire.
- Evapotranspiración en las hojas, que corresponde a la evaporación del agua en el interior de las hojas, la difusión del vapor a la superficie de las mismas y el transporte de dicho vapor hacia el aire.
- Evaporación y condensación del vapor de agua en la superficie del suelo, y la transferencia de vapor entre la superficie del suelo y el aire.

⁵ El efecto de masa térmica hace referencia a la capacidad potencial de almacenamiento de calor en un conjunto o sistema (http://es.wikipedia.org/wiki/Masa_t%C3%A9rmica).

⁶ La información sobre la vegetación recomendada para los techos verdes se encuentra disponible en la Tabla 7 y la Tabla 8.

- Transferencia del vapor y calor entre el aire atrapado entre las plantas y el aire libre.

De los anteriores, la transferencia de las ondas radioactivas es la única reacción que tiene un efecto significativo en el comportamiento térmico del techo verde (Barrio, 1998), por lo tanto un estudio que analice comportamiento de las ondas radioactivas permitirá predecir el comportamiento térmico del techo verde.

Por otra parte el suelo es un medio poroso compuesto por tres fases, la sólida corresponde a los minerales y la materia orgánica, la líquida al agua, y la gaseosa al aire y al vapor de agua. La transmisión de calor en sólidos y líquidos es conductiva, mientras que en líquidos y gases es convectiva, y ocurre gracias a la difusión de vapor entre los poros (Barrio, 1998). Para la selección del tipo de suelo se recomienda el uso de aquellos que son ligeros, porque reducen la conductividad térmica y el peso, tienen una gran capacidad de absorción del agua, lo cual es favorable teniendo en cuenta que la difusión térmica disminuye con el aumento de la humedad (Barrio, 1998). Contrastando con lo anterior, el suelo duro vuelve a irradiar el calor que recibe, almacenándolo y aumentando la temperatura ambiente del aire alrededor. Se puede deducir entonces que a menor densidad, menor conductividad térmica y menor flujo de calor a través el techo (Castleton, Stovin, et al., 2010).

El espesor del sustrato es otra de las características que define la capacidad de aislamiento térmico del techo verde, a mayor espesor mejor será su comportamiento. Por ejemplo por cada 10 cm que se incrementa el espesor de un sustrato compuesto por una arcilla seca, se aumenta en un 40% su capacidad de aislamiento térmico. En cuanto al contenido de humedad, un suelo seco es un buen aislante térmico, sin embargo gracias al proceso de evaporación del agua, la pérdida de calor es mucho mayor en suelos húmedos, además de que suministra las condiciones óptimas para el desarrollo de la vegetación (Castleton, Stovin, et al., 2010).

Generalmente en un techo verde se pierde un 58% del calor por la evapotranspiración, 30.9% por intercambio de radiación y un 1.2% es almacenado y transferido a la habitación inferior al techo. El ahorro de energía aproximado es del 1% al 6% en el verano, y del 0.5% durante el invierno. Es importante tener en cuenta que mejorar las condiciones térmicas en el verano puede dañar el comportamiento del techo verde en invierno, y que aunque el techo verde mejora la protección térmica de un edificio éste no reemplaza la capa aislante (Barrio, 1998; Castleton, Stovin, et al., 2010).

Para diseñar techos verdes que aislen térmicamente las edificaciones se desarrolló un modelo matemático basado en un análisis de sensibilidad paramétrica, que predice su comportamiento con base en los parámetros ya expuestos, y otros como el LAI, que representa la cantidad de superficies de hojas contenidas en un volumen unitario y el ángulo de distribución de las hojas en dicho volumen. Se desarrollaron de manera

independiente los modelos de la estructura de soporte, el suelo y el follaje de la vegetación. Posteriormente se acoplaron los modelos vegetación y suelo y por último la estructura de soporte (Barrio, 1998).

Castleton et al., (2010) afirma que D.J. Sailor (2008) adaptó un modelo de balance energético de techos verdes, para ser usado con un programa simulador llamado Energy Plus⁷, que tiene en cuenta el intercambio de calor radioactivo, conductividad y almacenamiento de calor en el suelo, efectos de humedad, y evapotranspiración del suelo y las plantas. Este modelo fue validado con mediciones realizadas en la Florida.

4.3 Efectos de aislamiento acústico

Los techos verdes son una estructura efectiva para aislar la contaminación auditiva proveniente principalmente de las vías vehiculares, los aviones y la maquinaria. Unos autores atribuyen esta propiedad a la porosidad del suelo, que permite que el sonido penetre el medio de crecimiento e interactúe con las partículas ocasionando la atenuación. Este fenómeno se da tanto en techos extensivos como intensivos (Timothy Van Renterghem and Dick Botteldooren, 2009). Otros autores agregan que las plantas y la capa de aire atrapada entre las plantas y la superficie de la cubierta, también tienen influencia en el efecto de aislamiento acústico. Las plantas tienen la capacidad de absorber las ondas de alta frecuencia, mientras que el sustrato bloquea las ondas de baja frecuencia (Callaghan, Peck, et al., 1999).

El espesor del sustrato del techo verde tiene una relación directa con la capacidad de atenuar la propagación de ondas sonoras. Un sustrato de 12 cm reduce el sonido en 40 decibeles, mientras que un sustrato de 20 cm lo disminuye en 46 decibeles (Callaghan, Peck, et al., 1999). Tanto los techos verdes intensivos como extensivos son útiles para disminuir la difracción de ondas en las cubiertas de las edificaciones. En el caso de los techos verdes extensivos se presentan picos de atenuación dependiendo de las variaciones de la profundidad del sustrato y de las frecuencias del sonido, sin embargo éstos se

⁷ Energy Plus es un simulador para el análisis energético y de carga térmica, desarrollado por el departamento de energía de EE.UU. Se encuentra disponible en la página web: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. La licencia es gratuita.

estabilizan cuando el espesor del sustrato acerca al máximo para este tipo de cubiertas, que corresponde a un espesor de 15 cm o 20 cm. El comportamiento de los techos verdes intensivos no cambia con el aumento del espesor de la cubierta. Cuando las frecuencias del sonido son bajas no son afectadas por la presencia o el tipo de techo verde (T. Van Renterghem and D. Botteldooren, 2008).

El área superficial del techo verde es un parámetro determinante para la difracción de ondas sonoras, mientras que la profundidad del sustrato y el tipo de techo verde tienen menor influencia en su comportamiento a nivel acústico. Para extensiones pequeñas de techos verdes la variación en el espesor del sustrato genera diferencias mínimas en la intensidad del sonido, mientras que para extensiones mayores de techos verdes, el espesor del sustrato tiene una relación directa con el aislamiento, y es beneficioso si se tiene un sustrato de mayor grosor y altamente permeable (Timothy Van Renterghem and Dick Botteldooren, 2009; H. S. Yang, Kang, et al., 2012).

La mayoría de mediciones y modelos realizados con respecto al desempeño a nivel acústico de los techos verdes descartan la vegetación, ya que su aporte es mínimo con respecto a los demás componentes de la cubierta, sin embargo las mediciones realizadas por Yang, Kang y Choi (2012) muestran que la presencia de hojas podadas tienen efectos positivos en la mitigación del ruido, e indican que si la capa de vegetación está bien diseñada se puede mejorar en la absorción de sonido en alrededor de 4 decibeles.

El efecto de aislamiento acústico de los techos verdes se percibe mejor en ambientes densamente urbanizados o cañones urbanos, donde se generan múltiples reflexiones de las ondas de sonido, contrario a lo que ocurre en las zonas abiertas donde la presión de sonido es muy baja (T. Van Renterghem and D. Botteldooren, 2008).

5 Esquema ambiental a escala Global

5.1 Preservación de zonas verdes y generación de hábitat

Los espacios verdes en las ciudades generalmente son limitados, se componen por algunos parques centralizados y separadores arborizados. Los techos verdes proveen áreas significativas de espacio verde, que en las ciudades densamente pobladas se convierten en una posibilidad de restauración del hábitat para las especies desplazadas durante la urbanización, debido a que el ecosistema elevado protege las especies de algunos depredadores, el tráfico, el ruido y la intervención humana (Afrin, 2009).

Los techos verdes pueden diseñarse de forma tal que apoyen la conservación de especies por medio de la generación de un hábitat propicio para su desarrollo. Una de las especies que habita en los techos verdes son las plantas colonizadoras, un estudio documentó alrededor de 35 especies colonizadoras en un techo verde sencillo ubicado en el Reino Unido. La mayoría de especies encontradas fueron malezas o plantas ruderales⁸ (Francis and Lorimer, 2011).

Entre más diversa sea la vegetación del techo, éste alojará mayor variedad de especies animales (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; Cook-Patton and Bauerle, 2012), y lo hace de las siguientes tres maneras: la primera es el incremento de la cantidad de especies vegetales para lograr la acumulación de diversidad de especies animales, mediante la generación de mayor disponibilidad y variedad de alimento y recursos para los diferentes animales. La segunda es mediante la especialización de recursos, que ocurre cuando algunos animales prefieren una o pocas especies de plantas como proveedoras de alimento y hábitat, por lo cual combinando las especies vegetales se puede atraer mayor cantidad de grupos especialistas. Finalmente la temporalidad y diversidad estructural de recursos es necesaria para la preservación de algunas especies, como en el caso de aquellos animales que requieren recursos continuamente en las diferentes estaciones, por lo cual necesitarán diferentes tipos de vegetación que pueda proveerlos. Por ejemplo el abejorro necesita plantas con especies que florezcan en diferentes épocas del año (Cook-Patton and Bauerle, 2012).

⁸ La planta ruderal es una planta que aparece en hábitats alterados por la acción del ser humano, es de corta vida pero con tasas de producción de semillas muy altas. Aparece generalmente en los bordes de los caminos (http://es.wikipedia.org/wiki/Planta_ruderal).

En cuanto a las especies animales, probablemente debido a las limitaciones de espacio del techo verde se favorece el desarrollo de especies de cuerpos pequeños que tienen la capacidad de dispersarse fácilmente y demandan pocos recursos para suplir sus necesidades fisiológicas (Francis and Lorimer, 2011). Pueden encontrarse organismos como arañas, escarabajos, avispas, hormigas, moscas, saltamontes, mariposas y abejas. La diversidad de invertebrados puede llegar a ser muy alta (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; Afrin, 2009; Francis and Lorimer, 2011). Por otra parte los techos verdes no generan un hábitat adecuado para las lombrices de tierra, ya que éstas no tienen la capacidad de colonizar de manera natural, y la mayoría de los sustratos son muy delgados para proveer un hábitat adecuado para ellas (Francis and Lorimer, 2011).

Los organismos de mayor tamaño como las aves utilizan los techos verdes para anidar o reproducirse y como hábitats temporales (Baumann, 2006; Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; Francis and Lorimer, 2011), debido a que el incremento de la urbanización ha fragmentado sus hábitats naturales algunas especies de aves han mostrado que pueden adaptarse a los cambios del paisaje urbano. La selección de la vegetación en los techos verdes está limitada por el tipo de sustrato y el espesor de éste, por lo que en muchas ocasiones no ofrece un recurso de comida para algunas especies de aves jóvenes que no son alimentadas por aves adultas y deben encontrar su comida y agua por ellas mismas (Baumann, 2006).

5.2 Efecto invernadero y el efecto isla de calor

El efecto isla de calor consiste en el incremento de la temperatura de la ciudad (Afrin, 2009), y se debe a la disminución de las zonas verdes ya que se reemplazan por superficies impermeables de concreto o asfalto (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; Alexandri and P. Jones, 2008; Afrin, 2009). Dicho efecto puede combatirse de dos maneras, la primera es aumentando el albedo⁹, y la segunda, incrementando la cobertura vegetal para favorecer la evapotranspiración (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; United States. Environmental Protection Agency, 2008; Afrin, 2009; Berghage, Beattie, et al., 2009a).

⁹ El albedo corresponde al porcentaje de radiación que refleja cualquier superficie, con respecto a la radiación que incide sobre la misma. Un albedo alto enfría el planeta, mientras que un albedo bajo lo calienta (<http://es.wikipedia.org/wiki/Albedo>).

Los techos verdes ofrecen la posibilidad de reducir dicho efecto por medio de las dos formas mencionadas anteriormente de manera simultánea (Environmental Protection Agency (EPA), 2008; Afrin, 2009; Berghage, Beattie, et al., 2009). En cuanto a la primera, las plantas del techo verde en conjunto con el medio de crecimiento bloquean la luz solar impidiéndoles alcanzar la membrana inferior. La vegetación absorbe con sus hojas parte de la radiación para ser usada en el proceso de fotosíntesis y refleja parte a la atmósfera. Además genera sombra en la superficie inferior a ellas por lo que se reduce la temperatura. Al estar fría la superficie se reduce el calor transmitido a la edificación y el que es emitido nuevamente a la atmósfera (United States. Environmental Protection Agency, 2008).

El segundo método es favoreciendo la evapotranspiración de la plantas, la cual consiste en la absorción de agua a través de sus raíces y la emisión de ésta por medio de sus hojas. La evaporación como tal ocurre en las superficies de la planta y en el medio de crecimiento que la rodea, y genera un enfriamiento del aire ya que usa el calor presente en la atmósfera para evaporar el agua y se aporta humedad al ambiente (United States. Environmental Protection Agency, 2008; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Un estudio realizado por Alexandri y P. Jones (2008) demuestra que los techos verdes tienen un potencial importante en la disminución de temperatura. La disminución de temperatura sobre el nivel del techo puede llegar hasta un nivel máximo de 26°C y en medio de las edificaciones hasta 11.3°C. Entre más caliente y seco sea el clima mayor será la acción de la vegetación en las temperaturas urbanas, y entre mayor cantidad de radiación solar reciba una superficie, mayor será la disminución de la temperatura si ésta está cubierta con vegetación (Alexandri and P. Jones, 2008).

El incremento de la temperatura en las ciudades demanda un mayor uso de energía en las edificaciones por el requerimiento de equipos para el acondicionamiento del aire, lo cual fomenta el aumento en la producción de gases de efecto invernadero¹⁰, debido a que se

¹⁰ Los gases que originan el efecto invernadero son Vapor de agua (H₂O), Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxidos de nitrógeno (N₂O), Ozono (O₃), Clorofluorocarbonos (CFC). (http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero). El efecto invernadero consiste en el calentamiento de la tierra debido a que el exceso de gases presentes en la atmósfera capturan el calor que ingresa, e impiden que sea transmitido hacia el exterior, incrementando la temperatura del planeta en 33°C por encima de la que debería tener (Cleveland and Morris, Christopher, 2009).

promueve la quema de combustibles fósiles para la generación de energía (Callaghan, Peck, et al., 1999; United States. Environmental Protection Agency, 2008; Xu, Sathaye, et al., 2012). Los techos verdes proveen beneficios para la reducción de las emisiones, debido a que la vegetación consume gases como el dióxido de carbono durante la fotosíntesis, ayudando a contrarrestar el cambio climático y removiendo algunos contaminantes de la atmosfera (Afrin, 2009; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011). También aportan a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, por el hecho de generar sombra y aislar térmicamente a las edificaciones (Callaghan, Peck, et al., 1999).

5.3 Impacto ambiental de los componentes de los techos verdes

Todos los elementos de los techos verdes excepto el medio de crecimiento están compuestos por polímeros como el polipropileno y el polietileno, que son materiales livianos y duraderos. El uso de polímeros es común en los techos verdes ya que permite reducir espesores y pesos manteniendo los beneficios ambientales (Bianchini and Hewage, 2012).

Las capas inferiores del techo verde están expuestas a esfuerzos altos por el peso de las capas superiores y al ataque de raíces, razones por las cuales los materiales que las componen deben tener alta resistencia a la tracción y al punzonamiento, propiedades que tienen los polímeros. Estos últimos se prefieren en la industria por su versatilidad, bajo peso, durabilidad, resistencia a la corrosión, capacidad aislante, bajo costo, y la capacidad de ser modificados o adaptados. Son amigables con el ambiente en cuanto a su potencial de reciclaje y reutilización, por ejemplo las capas de drenaje es tan compuestas por un 40% de polipropileno reciclado (Bianchini and Hewage, 2012).

Por otra parte los componentes del medio de crecimiento varían de acuerdo con la vegetación que se seleccione, algunas requieren mayor contenido de materia orgánica que otras. El contenido orgánico generalmente se compone de suelos de turba, cortezas y aserrín, y el contenido inorgánico debe ser una mezcla de arena, escombros y minerales porosos. Una buena mezcla de sustrato es aquella que mantiene un balance entre el peso, los nutrientes, el espesor y la durabilidad (Bianchini and Hewage, 2012).

Un estudio realizado por Yang et al. (2008) evalúa los beneficios ambientales de los techos verdes, principalmente la capacidad de remoción de contaminantes en el aire, y los compara con las emisiones de dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono y material particulado que se generan durante la fabricación de los materiales que componen sus capas, principalmente los polímeros, concluyendo que aunque la producción de estos

últimos es un proceso altamente contaminante, los techos verdes son catalogados como una práctica sustentable (Bianchini and Hewage, 2012).

Durante el análisis se evidenció que el uso de materiales reciclados durante el proceso de fabricación de los polímeros disminuye las emisiones de los contaminantes mencionados en el párrafo anterior, en comparación con el proceso de fabricación con materiales no reciclados. Comparando las tasas de emisiones del proceso de fabricación con las de remoción de contaminantes por parte de los techos verdes se encontró que se requieren al menos 1/3 o 2/3 de la vida útil de éste para remover la cantidad de contaminantes que aporta la fabricación de los materiales que lo componen (Bianchini and Hewage, 2012).

La vida útil de un techo verde depende del mantenimiento, el tipo de techo verde y las condiciones climáticas. La expectativa de vida útil de un techo verde se encuentra entre 40 y 55 años (Bianchini and Hewage, 2012). Según otra fuente, la vida útil es aproximadamente de 15 ó 20 años, después de este tiempo la membrana impermeabilizante debe reemplazarse, y debe hacerse este proceso cada 15 años. La vida útil máxima del techo verde es de alrededor de 60 años (Lockett, 2009).

En cuanto a la disposición final de los elementos de la cubierta una vez desmontada, el sustrato puede ser fácilmente reutilizado en otro propósito, mientras los polímeros no. La degradación de estos materiales es muy lenta y representan un 20% del material que ingresa a los rellenos sanitarios, por esto el reciclaje de estos materiales es la mejor opción. Adicionalmente reciclando se evita la producción de nuevos materiales, lo cual se recomienda, aunque este proceso tenga un impacto ambiental negativo (Bianchini and Hewage, 2012).

A pesar de la contaminación que aportan los componentes de los techos verdes durante su proceso de fabricación y disposición final, su construcción sigue siendo favorable para el ambiente, sin embargo es de vital importancia explorar la posibilidad de implementar materiales que puedan reemplazar los polímeros para mejorar la sostenibilidad general del techo verde (Bianchini and Hewage, 2012).

Se han realizado algunas exploraciones, que proponen el uso de materiales para reemplazar los empleados usualmente en los techos verdes. Uno de los estudios plantea la posibilidad de usar fragmentos de caucho reciclado en lugar de puzolana¹¹ como capa de drenaje en techos verdes extensivos, ya que éste no altera el desempeño del sistema y

¹¹ Las puzolanas son rocas volcánicas, que se originan por el enfriamiento brusco de la lava (<http://es.wikipedia.org/wiki/Puzolana>).

debido a que tienen menor densidad volumétrica que la puzolana, tienen mejores niveles de aireación y drenaje, además reducen el peso del sistema. Sin embargo la disposición final de este material una vez desmantelado el techo verde se convierte en un inconveniente (Vila, Pérez, et al., 2012).

Otro estudio realizado por Molineux, Fentiman, et al (2009) analiza la probabilidad de utilizar materiales reciclados como medio de crecimiento. Se efectuaron pruebas con cuatro tipos de materiales, el comportamiento del ladrillo rojo triturado conforme a los estándares establecidos en los lineamientos del Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL) se comparó con el de gránulos elaborados a partir de lodos de aguas residuales y arcilla, gránulos de ceniza de papel periódico reciclado, y gránulos de piedra caliza carbonatada. El resultado que se obtuvo fue que los gránulos fabricados a partir de materiales reciclados tienen un mejor desempeño que el ladrillo triturado y permiten el crecimiento saludable de las plantas (Molineux, Fentiman, et al., 2009).

Un proyecto desarrollado en Colombia por Forero, et al. (2011) propone el uso de botellas plásticas recicladas como contenedores del medio de crecimiento. El diseño consiste en un sistema modular que se instala sobre la cubierta de tejas onduladas de fibrocemento con una inclinación de 30%. Los diferentes módulos se conectan a un sistema de riego elaborado en tubos de ½ pulgada y micro tubos, que se alimenta de la escorrentía de agua lluvia captada de la misma cubierta (Forero, Devia, et al., 2011).

6 Esquema ambiental a escala local

6.1 Diseño

6.1.1 Dimensionamiento

Existen varios factores que pueden influenciar el diseño de un techo verde, desde el volumen de agua que se desee captar o retener, el uso que se le piense dar, el tipo de vegetación que se desee instalar, hasta el peso y la capacidad estructural de la edificación, definen las características de cada uno de los componentes de los techos verdes. Como no hay una determinante primordial no está establecido un único procedimiento de diseño, sin embargo se han creado una serie de recomendaciones para cada uno de los componentes del techo verde, y se han logrado desarrollar algunos modelos numéricos para predecir su comportamiento hidráulico.

A continuación se describirán detalladamente los componentes básicos de los techos verdes, sus funciones, propiedades y dimensiones si aplica:

Revestimiento a prueba de agua o capa impermeabilizante:

El revestimiento debe conformar una superficie monolítica y hermética. Existen dos tipos de membranas: la primera consiste en un producto de caucho asfáltico similar a la brea, que se aplica directamente sobre la cubierta en forma de líquido caliente. Es recomendable que antes de instalar la capa de revestimiento se retire completamente cualquier material que se haya instalado sobre la superficie de la cubierta. La segunda membrana consiste en una lámina termoplástica que se instala sobre una barrera de vapor¹² y la capa de aislamiento, para este caso el revestimiento debe anclarse a la cubierta para evitar que sea levantado por las fuerzas de succión del viento (Metropolitan Council, 2001; North Carolina Division of Water Quality, 2007; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

¹² Una Barrera de vapor es una lámina de un material resistente al paso de vapor de agua. Se utilizan en construcción para evitar el fenómeno de condensación intersticial, que es básicamente la condensación que se produce al interior de un material. Este fenómeno es típico de los aislantes térmicos (http://es.wikipedia.org/wiki/Barrera_de_vapor).

Sobre cualquiera de los dos tipos de impermeabilización anteriormente mencionados se recomienda instalar una capa protectora. Si el revestimiento es la membrana monolítica de asfalto se utiliza una capa protectora bituminosa y para el caso de la membrana plástica se utiliza polietileno de alta densidad (HDPE) (Metropolitan Council, 2001).

El revestimiento debe protegerse de los cambios de temperatura y del daño mecánico para asegurar la integridad de la estructura que soporta el techo verde. Se debe garantizar la confiabilidad de las membranas, poniéndolas a prueba inundando el techo, ya que una vez completada la instalación es difícil realizar reparaciones (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

La Tabla 2 sintetiza las propiedades de los materiales comúnmente usados para la capa impermeabilizante.

Tabla 2. Materiales para la capa impermeabilizante (Luckett, 2009).

Materiales para la capa impermeabilizante						
	Membrana EPDM	Membrana de TPO	Membrana de PVC	BUILT-UP ROOFING (BUR) (Techo acumulado)	Membrana de asfalto Modificado	Membrana de aplicación líquida
Frecuencia de utilización	Es la que se emplea con mayor frecuencia	Popularidad en aumento	-	Estrategia de uso común	Estrategia de uso común	Popularidad en aumento
Costo	Bajo costo	Puede incrementar el costo del proyecto	Puede incrementar el costo del proyecto	Bajo costo	Bajo costo	-
Uniones	Grandes longitudes, disminuye al mínimo las uniones	Uniones soldadas al calor	Uniones soldadas al calor	Monolítica	Monolítica	Monolítica
Resistencia al ataque de raíces	Excelente durabilidad y resistente al crecimiento de raíces.	Excelente durabilidad y resistente al crecimiento de raíces.	Excelente durabilidad y resistente al crecimiento de raíces.	Baja resistencia al ataque de raíces, requiere el uso de barreras anti raíces	Baja resistencia al ataque de raíces, requiere el uso de barreras anti raíces	Baja resistencia al ataque de raíces, requiere el uso de barreras anti raíces

Resistencia a ataques químicos	Poca resistencia a químicos y aceites, lo cual la hace inapropiada para uso en restaurantes	Excelente resistencia a químicos y aceites	Excelente resistencia a químicos y aceites	Poca resistencia a químicos y aceites, lo cual la hace inapropiada para uso en restaurantes	Poca resistencia a químicos y aceites, lo cual la hace inapropiada para uso en restaurantes	Poca resistencia a químicos y aceites, lo cual la hace inapropiada para uso en restaurantes
Espesores	Espesores comunes: 45 mm (0.002 psi), 60 mm (0.003 psi), y 90 mm (0.004 psi)	Espesores comunes: 45 mm (0.002 psi), 60 mm (0.002 psi), y 80 mm (0.003 psi)	Espesores comunes: 45 mm (0.002 psi), 60 mm (0.002 psi), y 80 mm (0.003 psi)	Espesores comunes: 0.013 a 0.021 psi (incrementar a 0.028 psi si hay superficie de gravilla)	Espesores comunes: 0.007 a 0.012 psi	Espesores comunes: 0.005 a 0.010 psi
Tipo de superficie	-	Superficie Blanca y reflectante	Superficie Blanca y reflectante	A menudo con superficie de gravilla	-	-
Metodología de instalación	-	Uso de equipo de soldadura térmica lo que disminuye el número contratistas calificados.	Uso de equipo de soldadura térmica lo que disminuye el número contratistas calificados.	-	Instalación por soplete (APP) o adherido (SBS)	Instalación como caucho caliente, o como membrana líquida sintética.

Barrera anti raíces:

Para evitar que las raíces perforen la capa aislante, se debe instalar una barrera anti raíces física o química sobre la capa protectora. Para el caso de cubiertas extensivas con plantas de raíces superficiales una barrera física delgada es suficiente. Cuando se tienen membranas monolíticas como revestimiento se deben usar espumas de poliestireno como aislamiento sobre la membrana anti raíces (Metropolitan Council, 2001).

En algunos casos el mismo producto que se usa como revestimiento tiene componentes químicos o condiciones físicas que lo convierten en barrera anti raíz (Metropolitan Council, 2001; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

La Tabla 3 muestra un comparativo de los materiales empleados como barrera anti raíces

Tabla 3. Materiales para barreras anti raíces (Luckett, 2009)

<i>barrera anti raíces</i>		
	<i>Telas Filtrantes</i>	<i>Plástico térmico</i>
Costo	Menor costo	Mayor costo
Tipo de material	Son materiales tejidos que sirven como filtro	Materiales soldados con el calor, forman una capa monolítica
Forma de proteger contra raíces	Poseen un químico que repele el crecimiento de raíces	Forma una barrera física ya que evita la penetración de raíces
Tipos de plantas con las que se emplean	Repele el crecimiento de plantas pequeñas como sedums y plantas suculentas	Evita la penetración de plantas grandes como arbustos, árboles pequeños y prados nativos
Adición de peso	No adiciona peso significativo al techo verde	-
Instalación	Se instala sobre la capa de drenaje	Debe instalarse bajo la capa de drenaje, y sobre la de impermeabilización

Capa de drenaje:

Es una capa continua que se ubica sobre la capa impermeabilizante, se encuentra en variedad de materiales como plástico duro, poliestireno, espuma, grava gruesa y ladrillo triturado reciclado, dependiendo de los requerimientos funcionales (North Carolina Division of Water Quality, 2007; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011). El producto que se seleccione para esta capa debe ser capaz de captar la descarga asociada a la tormenta de diseño evitando el encharcamiento de agua en la superficie de la cubierta (North Carolina Division of Water Quality, 2007). La capa de drenaje debe tener una buena conexión hidráulica con las canales, desagües y bajantes de la cubierta. Se recomienda usar redes que tengan una trasmisividad de 15 gal/min/pie o superior (North Carolina Division of Water Quality, 2007; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b). Generalmente consiste en elementos que se asemejan a cajas de huevos, agrupados de forma tal que generan una serie de pequeñas depresiones que retienen el agua para que las plantas la absorban durante periodos secos, y que a su vez permiten el drenaje de los excesos de agua, además ayuda a mantener aireado el sustrato (Metropolitan Council, 2001; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b)

La profundidad de la capa de drenaje varía dependiendo del nivel de escurrimiento deseado y de la capacidad estructural de los elementos que conforman la cubierta (Metropolitan

Council, 2001). Dicha profundidad también depende de un factor denominado capacidad de flujo, que hace referencia a que la capa de drenaje tenga la suficiente capacidad para evitar encharcamientos en las capas superiores a ésta. La capacidad de flujo depende de dos factores: del gradiente hidráulico, y de la presión de confinamiento del geocompuesto. Para techos verdes se recomienda un gradiente hidráulico de 0.01, y una presión de confinamiento de 20k Pa (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b). Los materiales comúnmente empleados como capa de drenaje se comparan en la Tabla 4.

Tabla 4. Materiales para la capa de drenaje (Lockett, 2009)

Capa de drenaje			
	Agregado	Geo-textiles	Combinación de drenaje con barrera de raíz
Instalación	Consisten en distribuir agregados a lo largo de la cubierta	Se instala desenrollando el material sobre la superficie	Se instala desenrollando el material sobre la superficie
Frecuencia de uso	Menos implementado	Se emplea ocasionalmente	Más sencillo y más empleado
Costos	Costo de transporte, suministro e instalación elevados	Menor costo que el agregado	-
Peso	Su peso es superior a 4lb/pie ² por cada pulgada de profundidad	Bajo peso, el peso exacto debe estar disponible en las especificaciones del fabricante	Bajo peso, el peso exacto debe estar disponible en las especificaciones del fabricante. Si no, es fácilmente calculable
Tipos de configuración	-	Hay varias configuraciones disponibles, la más común es la matriz de tazas alineadas en la lámina de plástico. Otras configuraciones son la de rejillas tejidos que permiten el paso del agua pero no la almacenan	Tiene una configuración de matriz de tazas alineadas en lámina de plástico. Esta combinación incluye también un filtro de fieltro que protege la capa sobre la que se instala este sistema
Flujo de agua	-	Permite el movimiento del agua lateralmente a lo largo de la superficie	Permite el movimiento del agua lateralmente a lo largo de la superficie

Filtro:

Para prevenir la obstrucción del sistema con partículas finas del sustrato y evitar que las raíces penetren la superficie se debe instalar un geotextil inmediatamente después del sistema de drenaje. Algunos de estos geotextiles incluyen un retardante de crecimiento de raíces como sulfato de cobre (Metropolitan Council, 2001; North Carolina Division of Water Quality, 2007; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

Sustrato o medio de crecimiento:

Los suelos para techos verdes deben ser mucho más livianos que las mezclas de suelos comunes, generalmente consisten en un 75% de mineral y un 25% de materia orgánica (Metropolitan Council, 2001) o un 80% de mineral y un 20% de materia orgánica (Luckett, 2009). La mezcla que se seleccione como material para el sustrato debe estar cuidadosamente proporcionada, con el fin de que pueda suplir las necesidades de oxígeno, nutrientes y humedad de las plantas, así como mantener un pH apropiado para su desarrollo (Metropolitan Council, 2001; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b). Además el sustrato debe ser permeable por el agua, retenedor de agua y aire, resistente a la putrefacción, el calor, las heladas y la contracción o compactación, debe dificultar el crecimiento de malas hierbas, y el desarrollo de plagas o enfermedades (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

El medio de crecimiento debe ser de baja densidad, con materiales que tengan una buena capacidad de retención de agua, por ejemplo mezclas que contengan pizarra y arcillas expansivas. Un medio de crecimiento apropiado para techos verdes debe retener entre un 40 y un 60% de agua con respecto a su peso, y tener densidades secas entre 35 y 50 lb/pie³ (North Carolina Division of Water Quality, 2007; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b). Por otra parte Green Roof Organization (2011) afirma que el medio de crecimiento debe retener entre el 25 y el 65% de agua con respecto a su volumen.

En cuanto a la profundidad del medio de crecimiento, debe ser tan delgado como la vegetación lo permita, y debe propiciar el buen anclaje de las plantas al sustrato, para evitar que sean arrastradas por la fuerza del viento (North Carolina Division of Water Quality, 2007; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011). En caso de emplear abono, se deben verificar las especificaciones, ya éste que tiende a descomponerse con el tiempo y por tanto puede variar el espesor del medio de crecimiento (North Carolina Division of Water Quality, 2007).

En cuanto al espesor del sustrato hay diferencias en la literatura. La Tabla 5 muestra algunas recomendaciones realizadas por diferentes fuentes:

Tabla 5. Espesores de sustratos recomendados

Espesores de sustrato recomendados		
Fuente	Espesores (cm)	
	Extensivos	Intensivos
North Carolina Division of Water Quality (2007)	7.6 cm a 15.2 cm	-
Woods-Ballard, Kellagher, et al. (2007b)	10.0 cm a 12.5 cm	12.5 cm a 25.0 cm
Hawaii Commission on Water Resource Management (2008)	10.2 cm a 15.24 cm	15.2 cm o más
Minnesota Stormwater Steering Committee (2008)	10.2 cm o menos	15.2 cm o más
Dunnett and Clayden (2007)	5.0 cm a 10.0 cm	20.0 cm a 50.0 cm
Groundwork Sheffield and Environment Agency, (2011)	8.0 cm a 20.0 cm	20.0 cm o más

En cuanto a otras propiedades del medio de crecimiento, el contenido de aire debe ser de un 10% del volumen, el pH debe estar entre 6 y 8.5, y la permeabilidad debe estar entre 0.3 y 30 mm/min para techos verdes intensivos y entre 0.6 y 70 mm/min para techos verdes extensivos (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011). En la tabla a continuación se comparan las propiedades de un sustrato comercial, y uno personalizado

Tabla 6. Tipos de sustratos para techos verdes (Luckett, 2009)

Medio de crecimiento		
	Mezcla comercial	Mezcla personalizada
Costos	Mayor costo	Menor costo
Ingredientes o componentes	contiene ingredientes innecesarios o indeseados	La disponibilidad de los ingredientes varía de acuerdo con la región, sin embargo el control de los componentes del sustrato es mayor y se pueden obviar los ingredientes no deseados
Peso	Han sido ensayados, para determinar el peso saturado, y la información está disponible para consideración	Existe disponibilidad de información del peso saturado de los agregados fabricados, pero de los naturales no, por lo que es necesario hacer un ensayo de saturación

Vegetación:

La variedad de plantas que pueden sobrevivir en el ambiente del techo es limitada, debido a los microclimas extremos que se generan. Las especies apropiadas son aquellas a las que su fisiología les permita tolerar suelos ligeramente ácidos, pobres, tener buenas condiciones de drenaje, tolerar el asoleamiento intenso, vientos fuertes, sequías y bajas temperaturas en el invierno, presencia de contaminantes, y deben ser colonizadores vigorosos (Metropolitan Council, 2001; North Carolina Division of Water Quality, 2007; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Para la selección de las plantas se debe tener en cuenta su composición fisiológica, contrastándola con el objetivo para el cual se diseñó el techo verde. Por ejemplo para los techos diseñados para retener el agua lluvia se recomienda el uso de sedum, debido al patrón de consumo de agua asociado con su metabolismo, mientras que si se trata de alcanzar una diversidad biológica o generar hábitat se debe emplear una combinación de plantas autóctonas de la región, preferiblemente seleccionadas por un ecologista experto (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Para techos verdes se recomienda el uso de sedums, flores silvestres, pastos y en general todas aquellas plantas que tengan raíces superficiales, que no crezcan más de un pie (30.5cm) de altura y toleren suelos poco profundos. Las plantas suculentas¹³ han demostrado tener un buen comportamiento en los techos verdes, incluso mejor que los pastos (Metropolitan Council, 2001; North Carolina Division of Water Quality, 2007).

Los especímenes de plantas que se pueden implementar según el tipo de techo verde se muestran en la Tabla 7.

¹³ Las plantas suculentas son aquellas que tienen la capacidad de almacenar mayores cantidad es de agua que las demás especies. Poseen dicha capacidad gracias a que sus raíces, hojas y tallos se han engrosado. Esta adaptación les permite vivir en lugares áridos y secos. El ejemplo más común son los cactus. (<http://es.wikipedia.org/wiki/Suculenta>)

Tabla 7. Tipos de vegetación (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011)

Selección de la vegetación			
Clases de plantas	Tipo de techo verde		
	Extensivos	Semi- intensivos	Intensivos
sedum	✓	✓	✓
musgos	✓	✓	✓
prados secos	✓	✓	✓
perennes de bajo crecimiento, resistentes a la sequía	✓	✓	✓
pastos	✓	✓	✓
plantas alpinas	✓	✓	✓
bulbos pequeños	✓	✓	✓
perennes de habitas poco húmedo		✓	✓
plantas anuales		✓	✓
arbustos pequeños		✓	✓
césped		✓	✓
arbustos medianos			✓
plantas comestibles			✓
pequeños arboles caducos			✓
coníferas			✓

La Secretaría Distrital de ambiente de Bogotá recomienda una serie de especies que son aptas para ser instaladas en los techos verdes. Estas se listan con algunas de sus propiedades en la tabla a continuación:

Tabla 8. Vegetación recomendada para techos verdes en Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011)

Vegetación recomendada disponible comercialmente en Bogotá				
Nombre común	Nombre científico	Irrigación	luz solar	Plagas o enfermedades
Calanchoe, coralito	Kalanchoe blossfeldiana	Moderada	Abundante	Resistentes a plagas, sensible a pudriciones por exceso de riego
Helecho arbóreo	Cyathea bicrenata	Abundante	Abundante	Babosas y caracoles

Anturio blanco, espatifilo	<i>Spathiphyllum wallisii</i>	Frecuente	Indirecta o parcial	Ácaros, pulgón, mosca blanca, hongos, y araña roja
Helecho pequeño	<i>Asplenium praemorsum</i>	Abundante	Indirecta	Resistentes a plagas
Helecho peine	<i>Nephrolepis</i> sp.	Abundante	Indirecta	Resistentes a plagas
Sedum	<i>Sedum</i> sp.	Moderada	Abundante	Resistentes a plagas, sensible a ataque de hongos por exceso de riego
Tulbagia	<i>Tulbaghia fragrans</i>	Frecuente	Abundante	Babosas y caracoles
Clivia	<i>Clivia miniata</i>	Abundante	Indirecta o parcial	Cochinilla algodonosa, hongos y roya
Diefembaquia	<i>Dieffenbachia</i> sp	Abundante	Indirecta o parcial	Cochinilla algodonosa, araña roja, pulgones, thrips, hongos o bacterias
Bella a las once, clavel chino, rayito de sol	<i>Lampranthus roseus</i>	Moderada	Abundante	Resistentes a plagas
Ganzania	<i>Ganzania splenden</i>	Moderada	Abundante	Thrips, pulgón, minador
Helecho	<i>Elaphoglossum</i> sp	Abundante	Indirecta o parcial	Resistentes a plagas
Anturio	<i>Anthurium patulum</i>	Abundante	Indirecta o parcial	Araña, cochinilla algodonosa, pulgón, hongos y bacterias

La composición y el carácter de la vegetación dependen de: la profundidad del sustrato que determina la diversidad y el rango de las diferentes especies y las condiciones climáticas que se definen principalmente por los periodos de lluvia y sequía (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007).

Un estudio realizado para determinar cómo diferentes tipos de plantas pueden afectar la escorrentía en los techos verdes demuestra que los pastos son más eficientes para disminuir la cantidad de agua que fluye del techo verde, seguidos por las hierbas y los sedums. Si el propósito principal de instalar el techo verde es para reducir el agua de escorrentía se recomiendan hierbas y pastos, ya que son de mayor altura, tallos más largos y de diámetros mayores, y mayor biomasa en las raíces y los brotes. Sin embargo como se mencionó anteriormente los sedums además de captar agua así sea en menor proporción tienen la capacidad de sobrevivir a condiciones climáticas extremas (Nagase and Dunnett, 2012).

Componentes opcionales de los techos verdes:

En algunas ocasiones se prefiere instalar capas que son de uso opcional que son adicionales a las anteriormente mencionadas, con el fin de mejorar el comportamiento del techo verde frente a un aspecto particular. Los componentes opcionales son:

Irrigación y almacenamiento de agua:

Los techos verdes deben ser capaces de almacenar agua, y no drenarla muy rápido. En caso de no ser posible debido a las condiciones del sustrato algunos techos verdes pueden requerir riego ocasional durante periodos secos prolongados (Metropolitan Council, 2001; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

Si el sistema requiere riego adicional se recomienda el uso de irrigadores que introducen agua directamente en la zona de raíces ya que se fomenta el crecimiento de raíces en la zona más profunda del sustrato, donde la temperatura y la humedad son más estables. También se mantiene seca la superficie, lo que genera una disminución en la germinación de semillas y se disminuyen las pérdidas de agua por evaporación (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

Protección anti caída:

En los techos verdes inclinados que tienen pendientes mayores a 18% es necesario instalar una serie de elementos que eviten el deslizamiento del sustrato y que desvíen las fuerzas de empuje (ZinCo Cubiertas Ecologicas S.L., 2007). Una de las estrategias consiste en anclar a la superficie de la cubierta una serie de estructuras modulares, similares a un panal de abejas, y en su interior compartimentar el medio de crecimiento, para evitar deslizamientos. En estos casos se recomienda el uso de sistemas de riego para evitar erosión (Lockett, 2009; ZinCo Cubiertas Ecologicas S.L., 2007).

Otro sistema anti caída son las barreras anti empuje, que se muestran en la Figura 3. Estos elementos deben anclarse a la estructura de la cubierta e impermeabilizarse por separado. Se deben realizar cortes en algunas zonas para permitir la eliminación de los excesos de agua. La distancia con la que se instalan depende de la pendiente de la cubierta; para pendientes de 30° la distancia máxima entre barreras debe ser de 5 metros, para 25° de 8 metros y para 20° de 10 metros (ZinCo Cubiertas Ecologicas S.L., 2007).



Figura 3. Barreras anti empuje

Fuente: Sistemas para ajardinar cubiertas inclinadas

Capa de aislamiento:

Para instalar un techo verde no se requiere aislamiento adicional, sin embargo algunos diseñadores lo usan para mejorar la eficiencia térmica de la edificación. Los techos verdes pueden ser fríos cuando se deja un espacio de aire separando la membrana impermeabilizante del aislamiento o cálidos cuando el aislamiento cubre la capa impermeabilizante. Pueden emplearse materiales como poliuretano, lana mineral de alta densidad y poliestireno expandido (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Pascual, 2009).

A continuación se anexa la Tabla 9 que muestra las propiedades de algunos materiales usados como aislamiento.

Tabla 9. Materiales para aislamiento de la cubierta (Lockett, 2009)

Materiales para capa de aislamiento				
	<i>poliisocianurato</i>	<i>poliestireno extruido</i>	<i>poliestireno expandido</i>	<i>Fesco Board</i>
Tipo de aislamiento	Aislamiento primario	Aislamiento primario	Aislamiento primario	Aislamiento primario o placa protectora para aislamientos de espuma
Contacto con el agua	Debe mantenerse seco	Impermeable	Debe mantenerse seco	Debe mantenerse seco
Posición de instalación	instalación bajo la capa impermeabilizante	Puede instalarse bajo o sobre la capa impermeabilizante	instalación bajo la capa impermeabilizante	instalación bajo la capa impermeabilizante

Cantidad de capas	puede haber una sola capa adherida directamente a la superficie	debe tener una placa de cobertura, para que se adhiera completamente la capa impermeabilizante	debe tener una placa de cobertura, para que se adhiera completamente la capa impermeabilizante	debe estar adherido o totalmente suelto cuando se usa bajo el techo verde no usar sujetador mecánico
Peso por pulgada de espesor	0.001 a 0.002 psi	0.002 psi	0.0007a 0.001 psi	0.005 psi
Factor de resistencia térmica	6	5	3.5	2.78

Capa protectora

Presta una protección adicional a la capa de impermeabilización, la barrera anti raíz y la capa aislante, es imprescindible en aquellos techos donde el riesgo de punzonamiento es alto, y puede emplearse para separar compuestos que son químicamente incompatibles. La Tabla 10 muestra los materiales comúnmente empleados y sus propiedades (Pascual, 2009).

Tabla 10. Materiales para la capa protectora (Luckett, 2009).

Materiales para capa protectora			
	Tableros a base de yeso (DENS DECK OR DURABOARD)	fibra de madera (FESCO BOARD)	poliestireno extruido (DOW BOARD)
Contacto con el agua	Debe mantenerse seco	Debe mantenerse seco	Es impermeable
Lugar de instalación	Se instala debajo de la impermeabilización	Se instala debajo de la impermeabilización	Se instala debajo de la impermeabilización
Tipo de aislamiento	Protege el aislamiento del calor y los ataque químicos durante la instalación de la impermeabilización	Protege el aislamiento del calor y los ataque químicos durante la instalación de la impermeabilización	se usa como aislamiento primario
Resistencia ante cargas	Ayuda a distribuir las cargas puntuales o las cargas que genera el tránsito sobre el techo verde	Es menos denso que el tablero a base de yeso, por lo que tiene menor durabilidad ante cargas puntuales	-

Forma de instalación	No deben usarse sujetadores mecánicos ya que estos pueden romper la membrana impermeabilizante, debe instalarse suelto o adherido	No deben usarse sujetadores mecánicos ya que estos pueden romper la membrana impermeabilizante, debe instalarse suelto o adherido	Tiene la desventaja de que deben instalarse rápidamente los demás componentes del techo verde para evitar que se levante
Espesores y pesos	Los espesores más comunes son: 1/4 pulg (0.008psi), 1/2 pulg (0.014 psi), and 3/4 pulg (0.017 psi)	Los espesores más comunes son: 1/2 pulg (0.003 psi)	El peso por cada pulgada de espesor es de 0.002 psi.

Retenedores de humedad:

Son materiales que capturan y almacenan agua, y proporcionan un ambiente propicio para la generación de nutrientes. Se recomiendan principalmente en zonas secas donde se usan plantas de mayor nivel de humedad o donde es imposible lograr un mayor espesor del sustrato (Luckett, 2009; Pascual, 2009). La Tabla 11 muestra los materiales comúnmente empleados y sus propiedades.

Tabla 11. Materiales retenedores de humedad (Luckett, 2009)

<i>Materiales para capa retenedora de humedad</i>			
	<i>Telas</i>	<i>Paquetes de gel y partículas</i>	<i>Alfombrillas en forma de cáscara de huevo con perforaciones</i>
Tipos de presentaciones y lugar de instalación.	Debe ubicarse preferiblemente sobre la capa anti raíz para permitir el contacto directo con las raíces de las plantas, sin embargo puede ubicarse bajo ella	Disponible en varias presentaciones, como paquetes laminados en un geo-textil, como bolsas estratégicamente ubicadas, o como partículas uniformemente distribuidas en el sustrato	Es el mismo producto que se implementa como capa de drenaje, que consiste en la matriz de tazas que almacena agua, y unas perforaciones que eliminan excesos, se ubica bajo el sustrato y sobre la capa anti raíces
Capacidad de almacenamiento de agua	Algunos materiales almacenan gran cantidad de agua	Absorben varios cientos de veces su volumen en agua, y lo descargan lentamente	Retiene y almacena una cantidad moderada de agua
Compatibilidad con las plantas	El que permanezca mucho tiempo la humedad puede ser nocivo para plantas como los sedums.	Como absorbe tanta cantidad de agua, puede tomar agua de las plantas en periodos secos	-

Desventajas	-	Por la expansión y contracción al capturar y liberar agua reduce la capacidad del sustrato de amortiguar temperaturas extremas	-
Vida útil	-	Vida útil de 10 años. Funciona como medio para establecer la vegetación del techo pero no como medida de irrigación a largo plazo	-

6.1.2 Diseño hidráulico

La capacidad de almacenamiento de agua de un techo verde es mínimo del 20% y máximo del 65% de su volumen, esta propiedad está dada por el sustrato y depende de características como la porosidad, el contenido de humedad y la conductividad hidráulica de este. Esta capacidad también depende de factores como la intensidad del evento de precipitación, las precipitaciones anteriores, el periodo del año, la evapotranspiración y la pendiente del techo (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; North Carolina Division of Water Quality, 2007).

Los techos verdes pueden atenuar tormentas con un periodo de retorno hasta de dos años con una duración de 24 horas sin inundar el techo verde, y contribuyen a la atenuación de escorrentía de tormentas largas. Durante eventos de lluvia extrema el comportamiento de un techo verde se equipara al de una cubierta normal, por lo que el sistema de drenaje de la cubierta debe diseñarse como tal techo (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; North Carolina Division of Water Quality, 2007). La escorrentía de otros techos no debe pasar al techo verde (Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b).

Los caudales que se empleen para el diseño deben basarse en la atenuación de la escorrentía pico ocurrida en la cubierta (North Carolina Division of Water Quality, 2007).

Para dimensionar los techos verdes el criterio de diseño determinante es la capacidad de almacenamiento de agua, ya que el objetivo principal es que actúen como SUDS. Bajo dicho criterio se han desarrollado los siguientes procedimientos:

1. *Guía de diseño y dimensionamiento* (New York Center for Watershed Protection, 2003)

Para verificar el volumen de agua que almacena un techo verde, se puede realizar un cálculo sencillo basado en el volumen de agua que puede recolectar el medio de crecimiento, la capa de drenaje y el encharcamiento superficial. A continuación se muestra una aproximación a la estimación del volumen de agua que puede ser efectivamente almacenado y tratado por este sistema:

$$WQ_V \leq V_{SM} + V_{DL} + (D_P * A_{GR})$$

Y:

$$V_{SM} = A_{GR} * D_{SM} * n_{SM}$$

$$V_{DL} = A_{GR} * D_{DL} * n_{DL}$$

Donde:

WQ_V = Volumen de agua efectivamente almacenado y tratado (pie^3)

V_{SM} = Volumen del medio de crecimiento (pie^3)

V_{DL} = Volumen de la capa de drenaje (pie^3)

D_P = profundidad de encharcamiento sobre la superficie (pie)

A_{GR} = Area superficial del techo verde (pie^2)

D_{SM} = Espesor del medio de crecimiento (pie)

n_{SM} = Porosidad del medio de crecimiento (~20%)

D_{DL} = Espesor de la capa de drenaje (pie)

n_{DL} = Porosidad de la capa de drenaje (~25%)

El volumen que se obtenga de esta ecuación debe ser mayor o igual al volumen de agua efectivamente almacenado, el cual está definido de manera diferente para cada zona. En la tabla a continuación se ejemplifican algunas de éstas:

Tabla 12. Estimación del volumen de agua efectivamente almacenado

Estimación del volumen de agua efectivamente almacenado		
	Formula	Donde
Nueva York (New York Center for Watershed Protection, 2003)	$WQ_V = \frac{P * Rv * A}{12}$	<i>P = 90% del evento de precipitación</i> <i>Rv (coeficiente de escorrentía) = 0.05 + (I * 0.009)</i> <i>A = Area total del sitio en acres</i> <i>I = porcentaje de cobertura impermeable</i>
Georgia (AMEC Earth and Environmental, Center for Watershed Protection, et al., 2001)	$WQ_V = \frac{1.2 * Rv * A}{12}$	<i>Rv = 0.05 + (I * 0.009)</i> <i>A = Area del sitio en acres</i> <i>I = porcentaje de cobertura impermeable</i>
Maryland (Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000a)	$WQ_V = \frac{P * Rv * A}{12}$	<i>P = 1.0 pulg de lluvia, para la zona occidental.</i> <i>P = 0.9 pulg de lluvia, para la zona oriental.</i> <i>Rv (coeficiente de escorrentía) = 0.05 + (I * 0.009)</i> <i>A = Area total del sitio, en acres</i> <i>I = porcentaje de cobertura impermeable</i>
Minnesota* (Minnesota Stormwater Steering Committee, 2008)	$V_{wq} = 0.5 \text{ pulg} * IC * \frac{1}{12}$	<i>V_{wq} = Volumen de agua efectivamente almacenado</i> <i>IC = Cobertura impermeable del sector, en acres.</i>

* Minnesota tiene cuatro reglas para el cálculo del volumen de agua efectivamente almacenado, que se aplican según el tipo de SUDS y el tipo de agua a almacenar. Los techos verdes clasifican en la regla 3, como SUDS de no estanqueidad.

El método anteriormente descrito puede ser adaptado para diferentes zonas mediante la determinación del valor de la variable "P" para cada una de ellas. Dicha variable corresponde al 90% de la precipitación promedio anual, y puede determinarse mediante la realización de un estudio del balance hídrico del lugar, en un periodo de tiempo de un año (Monsalve Sáenz, 1999; Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b; New York Center for Watershed Protection, 2003).

2. Dimensionamiento general (Virginia Stormwater BMP Clearinghouse Committee, 2011)

Los techos verdes deben diseñarse para captar una parte del volumen de agua efectivamente almacenado, lo cual dependerá de factores como la porosidad y

conductividad hidráulica del sustrato y del material de drenaje subyacente. Para determinar dicho volumen se debe emplear la siguiente ecuación:

$$T_V = \frac{RA * D * P}{12}$$

Donde:

T_v = Volumen almacenado (pie³)

RA = Área de techo verde (pie²)

D = Espesor del sustrato (pulg)

P = Porosidad del sustrato (generalmente 0.3)

El resultado de esta ecuación debe compararse con los valores que se muestran en la Tabla 13 para determinar si se iguala o excede el volumen requerido para cada nivel de diseño¹⁴.

Tabla 13. Niveles de diseño

Niveles de diseño y volúmenes de agua efectivamente almacenados		
Parámetro	Diseño nivel 1	Diseño nivel 2
<i>Reducción de escorrentía</i>	45%	60%
<i>Pofundidad del sustrato</i>	Hasta 10 cm	De 10 a 20 cm
<i>Sistema de drenaje</i>	Alfombras de drenaje	Capa de grava de 5 cm
<i>Materia orgánica</i>	Hasta 20%	Hasta 10%
<i>Volumen de agua efectivamente almacenado</i>	$T_V = \frac{1.0 * R_v^* * A}{12}$	$T_V = \frac{1.1 * R_v^* * A}{12}$

* R_v representa el coeficiente de escorrentía, usualmente es de 0.95.

¹⁴ En el estado de Virginia se establecieron dos diseños predeterminados de techos verdes, uno de ellos se denomina diseño nivel uno y corresponde a un diseño de referencia. El diseño nivel dos, es una mejora del anterior en cuanto a la disminución de la escorrentía superficial y al incremento en la absorción de nutrientes (Virginia Stormwater BMP Clearinghouse Committee, 2011).

6.1.3 Diseño estructural

Parte del diseño del techo verde consiste en verificar que la estructura de la edificación sea capaz de soportar las cargas que se le van a imponer, este trabajo debe ser realizado por una persona capacitada, preferiblemente un ingeniero estructural (Luckett, 2009).

En caso de que se piense instalar el techo verde en una edificación existente el ingeniero debe realizar un análisis estructural, y con base en el resultado diseñar el techo verde, para que sea compatible con las características de la estructura. Si la edificación en la que se va a instalar el techo verde es nueva, el diseño estructural debe considerar las cargas que le serán impuestas por el techo verde. Si los requerimientos del sistema son altos o el costo de construcción es elevado debe rediseñarse el techo verde (Luckett, 2009).

Un edificio con techo verde debe cumplir con todos los criterios estructurales que exigen los códigos de construcción de cada país, tanto el sistema estructural como los componentes que generen carga deben estar diseñados de acuerdo con éstos (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Para el diseño de los techos verdes como tal se deben evaluar las siguientes cargas:

Carga muerta: Corresponde al peso en estado saturado de todos los componentes del techo verde, también se deben tener en cuenta las cargas puntuales generadas por elementos ubicados en la cubierta como tanques de agua o árboles altos (Lanarc Consultants Ltd., Kerr Wood Leidal Associates Ltd., et al., 2005; Hawaii Commission on Water Resource Management, 2008; Luckett, 2009; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Carga viva: Se debe considerar como carga viva el exceso de agua que fluirá por el techo verde una vez se encuentre saturado el sistema. También debe tenerse en cuenta el peso de las personas en las cubiertas transitables, y en el caso de las que no son diseñadas para el acceso al público debe considerarse el peso del personal que realizará el mantenimiento (Luckett, 2009; Metropolitan Council, 2001).

Carga de viento: Para el análisis del efecto de esta carga se deben usar los pesos secos del sistema de techos verdes. Dependiendo de qué tan alta sea la carga de viento puede requerirse el uso de elementos como redes, que contrarresten la succión que genera el viento, o de materiales más pesados (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Fuerza cortante: Esta fuerza debe considerarse en el caso en que se esté diseñando una cubierta inclinada. Se debe diseñar un refuerzo contra cortante para evitar generar tensiones en la membrana impermeabilizante inferior. Generalmente se utilizan barreras

anti deslizamientos o sistemas de retención discontinuos (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Carga de Nieve: Se considera una carga aparte de las demás ya que la literatura difiere en su forma de calcularla, algunos autores afirman que debe considerarse como carga muerta (Metropolitan Council, 2001; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011) y otros consideran que corresponde a una carga viva (Lockett, 2009).

Para el caso de Colombia puede descartarse la carga de nieve, sin embargo es importante tener en cuenta que la norma NSR-10 contempla la carga de granizo en las edificaciones, por lo que sería pertinente estudiar cuál será la influencia del granizo en el comportamiento estructural de un techo verde.

6.2 Construcción

Programación de actividades y preparación del sitio:

Se debe realizar un programa de trabajo con el fin de garantizar el cumplimiento de los tiempos para la instalación de los componentes de la cubierta, especialmente para la capa impermeabilizante, y desarrollar las estrategias para garantizar la integridad de ésta. El programa debe incluir además los siguientes parámetros: horarios de trabajo, ubicación del campamento, del centro de acopio, el acceso del personal y de materiales y la forma de retiro de material de desecho (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Es importante llegar a un acuerdo con los proveedores con respecto al tiempo de entrega de los materiales, para que se realice de manera oportuna y así reducir al máximo el tiempo de almacenamiento, principalmente el de la vegetación (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Se debe contar con expertos en las áreas de arquitectura o ingeniería y horticultura o biología, quienes deberán revisar la información técnica y las especificaciones técnico constructivas, e identificar y resolver conflictos, contradicciones u omisiones (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Todas las obras civiles deben haber concluido antes de comenzar con la instalación de la cubierta, entre ellas las obras de drenaje y los tapajuntas (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

En cuanto a la preparación del sitio de instalación, se deben realizar los siguientes procesos:

1. El acabado de la placa o superficie sobre la que se va a instalar el techo verde debe ser homogéneo, sin fisuras ni sobresaltos, con el fin de evitar fisuras en la membrana impermeabilizante o filtraciones y estancamiento de aguas (Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).
2. Es indispensable tener pendientes de al menos 2% para garantizar el drenaje, y evitar posibles estancamientos de agua. Estas pendientes pueden lograrse con la inclinación de la placa de soporte o mediante un mortero de nivelación (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011; Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b)
3. La red de evacuación de agua de la cubierta puede estar conformada por desagües puntuales o lineales, se debe evitar que la cobertura vegetal tenga acceso a ellas, y generar los medios para su inspección. Se deberán prever soscas o rejillas de protección, y en el caso de los sistemas lineales reboses para evitar colmatación por granizo (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Instalación de los componentes del sistema:

Capas de impermeabilización y barrera anti raíz:

La correcta instalación de la membrana impermeabilizante es esencial para el funcionamiento adecuado del techo verde (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Metropolitan Council, 2001; North Carolina Division of Water Quality, 2007). La capa de impermeabilización debe instalarse de forma monolítica a lo largo de la superficie del techo, incluso en las áreas en las que no se instalará vegetación. Esta capa deberá instalarse cuando hayan culminado todas las actividades que impliquen tránsito por la cubierta, y no se deben realizar otras actividades de construcción de manera simultánea a su instalación, con el fin de evitar daños mecánicos (Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011). En caso de requerirse la barrera anti raíces debe instalarse sobre la impermeabilización (North Carolina Division of Water Quality, 2007; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Después de instalada se debe realizar un test¹⁵ para asegurar que no existen filtraciones en ninguna zona de la cubierta, incluso en las que no serán vegetalizadas. (Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b; Metropolitan Council, 2001; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Luckett, 2009).

Se recomienda marcar los puntos de drenaje antes de instalar las capas protectoras, con el fin de poder ubicarlos fácilmente y posteriormente cortar el material de manera adecuada (Metropolitan Council, 2001).

Capas de drenaje:

La capa de drenaje debe tener una pendiente adecuada para permitir el drenaje (al menos 2%) y una distribución apropiada de elementos de drenaje para evitar encharcamientos u obstrucciones en el drenaje de agua lluvia. Si la capa de drenaje es de material granular su instalación será más compleja que si se trata de productos fabricados que vienen en presentación de rollos, y se disponen con facilidad las capas anteriores (Luckett, 2009; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011). Esta capa debe instalarse de manera continua, y si se desea puede extenderse a las áreas perimetrales de material de filtro (Luckett, 2009).

Los techos inclinados de grandes extensiones pueden requerir en los bordes mayor tamaño de canales, para garantizar el drenaje (Luckett, 2009).

Capas filtrantes:

La barrera filtrante deberá extenderse en capas garantizando un traslapo de 15 centímetros como mínimo, y deberá ajustarse en las zonas de borde, perfiles de transición o cámaras de acceso a los drenajes (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Para capas de protección, de drenaje y filtrantes, debido a la diversidad de productos disponibles se recomienda que se sigan las recomendaciones para la instalación suministradas por el proveedor (Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011). Se deberá realizar un control de calidad para certificar el proceso de construcción y

¹⁵ La prueba consiste en inundar la cubierta con agua hasta un nivel aproximado de 5 cm por encima de la media caña, la inundación debe mantenerse por un periodo mínimo de 24 horas. Pasado este tiempo se realiza una inspección visual de la parte inferior de la placa en búsqueda de filtraciones. (<http://www.construmatica.com/construpedia/AP-023>. Prueba de Estanqueidad de Cubiertas Planas)

se debe contemplar la necesidad de usar pesos temporales durante el proceso de instalación para evitar el levantamiento de materiales por la acción del viento (Metropolitan Council, 2001; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Luckett, 2009).

Sustrato:

La elección de la forma de elevar el sustrato hasta el nivel del techo, y posteriormente dispersarlo a lo largo de la cubierta dependerá en gran medida de las condiciones de cada proyecto, como lo son el área, la pendiente, la estructura, el acceso y la disponibilidad de equipos, y debe encaminarse a seleccionar el método de instalación más eficiente en cuanto a costos y tiempo (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Para proyectos pequeños o proyectos grandes que tengan múltiples espacios en el techo se prefieren bolsas o bultos que contengan el sustrato, ya que son fácilmente elevables por medio de grúas o equipos de elevación similares. Para proyectos de gran envergadura se recomiendan las entregas al por mayor. El almacenamiento del sustrato se realiza en silos y posteriormente se bombea sobre el techo (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

La distribución del medio de crecimiento es fundamental para lograr el espesor correcto y la cobertura adecuada, como guía se puede trazar una grilla con listones de madera (Luckett, 2009). Se recomienda también instalar el sustrato en dos capas sin compactar, de la siguiente forma: se instala 1/2 ó 1/3 parte del espesor del sustrato, y una vez ocurrida la compactación natural se instala la segunda capa, cuya altura dependerá del grado de asentamiento (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011). Una vez distribuido el suelo se debe decidir en qué lugar se sembrará cada planta (Luckett, 2009).

Vegetación:

La selección del momento en el que se instala la vegetación dependerá de las condiciones climáticas, el costo y los requerimientos de instalación instantánea (North Carolina Division of Water Quality, 2007; Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

La vegetación se puede instalar mediante:

1. Tapete vegetal: Las alfombras de especies vegetales son cultivadas en campo hasta alcanzar su madurez, lo que les permite ser enrolladas y transportadas para posteriormente ser instaladas directamente sobre el sustrato preparado, y con un buen contenido de humedad. Las esteras de vegetación deben estar completamente mojadas, con un grado de consolidación de mínimo 75%, y mantenerse húmedas durante cuatro o cinco semanas hasta que la vegetación se establezcan (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011). Los bordes de las esteras

suelen ser articulados, aunque deben consultarse las especificaciones del fabricante para establecer cualquier riesgo de contracción (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

2. Siembra de plantas jóvenes: inicialmente las plantas son sembradas en recipientes individualmente, y posteriormente son trasplantadas, con la posibilidad de ofrecer mayor diversidad de especies. La tasa de cobertura con la que se deben instalar las plantas dependerá del tamaño de éstas, por lo general de 15 a 20 plantas por metro cuadrado (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011). Antes de la siembra, el sustrato, la capa de drenaje y cualquier capa que capture humedad debe ser saturada, se debe aplicar en el sustrato un fertilizante y una vez plantada la vegetación asegurarse de mantener la humedad durante cuatro o cinco semanas para que las plantas puedan establecerse (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011). Se debe evitar el tránsito sobre el sustrato, por esta razón la siembra debe hacerse desde el centro hacia los extremos, y se deben ubicar tablas sobre el sustrato para distribuir la carga uniformemente y evitar desniveles (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).
3. Hidro-plantación y siembra de semillas: Se extienden las semillas sobre la superficie preparada con abono, para que permita que las semillas germinen. Se debe realizar una mezcla de mínimo seis especies. La mezcla de semillas comúnmente se extiende a mano y se cubre con un manto líquido que provee una fuente de nutrientes orgánicos (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011). Las semillas deben protegerse para evitar que sean removidas por el viento y las aves, deben tener buen contenido de humedad en la siembra y ser regadas constantemente durante la germinación (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).
4. Plantación por esqueje: Esta forma de plantación debe realizarse durante la instalación del sustrato. Se deben colocar esquejes o tallos sanos entre el sustrato, aproximadamente a un centímetro de la rasante. Se deben colocar mínimo 20 esquejes por cada metro cuadrado de techo verde (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Instalación de perímetros y accesorios:

Los detalles de los perímetros, como aleros o crestas, las tomas de drenaje, los cortafuegos, la incorporación de sistemas anti caídas y las discontinuidades como chimeneas y claraboyas, deben instalarse siguiendo las especificaciones dadas en los

planos de detalles y por los respectivos fabricantes (Groundwork Sheffield and Environment Agency, 2011).

Se deben instalar elementos auxiliares o accesorios que permitan la transición entre las diferentes áreas de la cubierta, estos elementos deben estar fabricados en materiales que soporten la intemperie y la humedad (Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011). Por ejemplo en los techos verdes que no terminan en parapetos se debe retener el sustrato, para esta labor se puede usar madera, sin embargo ésta se deteriora fácilmente. Otra opción son los productos comerciales, como los bordes en lámina de metal que poseen perforaciones que permiten el drenaje adecuado del agua. En las zonas de gravas libres de vegetación se usan retenedores del medio de crecimiento, que tienen una configuración similar a los bordes anteriormente descritos (Luckett, 2009).

Otro de los accesorios que se deben instalar son las cámaras de acceso a los drenajes de la edificación, para evitar que partículas de suelo ingresen al sistema de drenaje (Luckett, 2009).

6.3 Mantenimiento

El requerimiento frecuente de mantenimiento es común durante los primeros tres años tras la instalación del techo verde, sin embargo éste varía dependiendo del sistema que se haya instalado. Los techos verdes intensivos requieren mantenimiento regular, dependiendo del tipo de vegetación puede demandar poda semanal o quincenal y deshierbes semanalmente, quincenalmente o hasta anualmente (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

Por otra parte los techos verdes extensivos requieren una visita anual o cada dos años, en la que se debe remover hojas secas, y se debe verificar el estado de las barreras cortafuegos, los drenajes y en algunos casos remover plantas colonizadoras indeseadas (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).

Los requerimientos de mantenimiento de un techo verde son:

1. Mantenimiento regular: se deben remover residuos y hojas secas para prevenir obstrucciones en los drenajes y evitar que interfieran en el crecimiento de las plantas (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011), se recomienda realizar esta actividad cada seis meses o anualmente. También deben reemplazarse las plantas muertas, durante el periodo de establecimiento del techo verde se debe realizar mensualmente, y una vez establecido se recomienda hacerlo anualmente (Woods-Ballard, Kellagher, et

al., 2007b). Cada seis meses se debe remover la vegetación indeseada e invasiva (Metropolitan Council, 2001; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Scheueller, Hirschman, et al., 2007; North Carolina Division of Water Quality, 2007; Luckett, 2009; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011).

Es necesario podar y cortar las plantas cuando éstas excedan el crecimiento deseado, o para eliminar partes enfermas y promover la regeneración de su follaje. La irrigación se requiere durante el periodo de establecimiento de la vegetación, la frecuencia e intensidad de ésta dependerá del tipo de vegetación, sin embargo lo ideal es eliminarla totalmente con el paso del tiempo (Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b; Scheueller, Hirschman, et al., 2007; North Carolina Division of Water Quality, 2007; Luckett, 2009; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011). La fertilización también es un procedimiento importante, se recomienda realizarla anualmente (Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment, 2000b; North Carolina Division of Water Quality, 2007; Luckett, 2009; Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, et al., 2011). Una fuente afirma que durante los primeros tres a cinco años después de la instalación (Luckett, 2009), mientras la otra sostiene que la fertilización se requiere únicamente en el primer año, durante el establecimiento de la vegetación (Scheueller, Hirschman, et al., 2007).

2. Acciones correctivas: en caso de que se formen canales de erosión, se debe identificar la fuente que la ocasiona y controlarla, y los canales deben estabilizarse adicionando suelo del sustrato, lo más similar posible al material original. Si los accesos a los drenajes se han asentado, fisurado o desplazado, éstos deben ser reparados (Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b).
3. Monitoreo: se recomienda inspeccionar cada uno de los elementos que conforman el techo verde y verificar que estén operando de manera adecuada. En el sustrato no debe haber señales de erosión ni en los accesos a los drenajes haber elementos que puedan restringir el paso de agua, y en la parte inferior del techo no debe observarse señales de humedad ocasionada por fugas (Metropolitan Council, 2001; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b). Se recomienda también observar el follaje de las plantas para identificar oportunamente la presencia de plagas y realizar las acciones correctivas (Luckett, 2009).

6.4 Comportamiento Hidrológico

Con respecto a este tema existen notables diferencias en la literatura, debido a los diferentes resultados de estudios realizados bajo distintas condiciones. Se conoce que los techos verdes tienen la capacidad de alterar la escorrentía de agua lluvia debido a que influyen sobre ésta de dos maneras diferentes, una consiste en reducir la cantidad de agua lluvia mediante la absorción, transpiración y evaporación (Carter and Rasmussen, 2007; Dunnett and Clayden, 2007) y la otra en almacenar el agua por un periodo antes de que escurra, actuando como amortiguador (Dunnett and Clayden, 2007).

El agua almacenada por el techo verde es liberada gradualmente, por lo que los picos de las tormentas disminuyen, y así el sistema de drenaje está disponible para evacuar la cantidad de agua que ingresa (Dunnett and Clayden, 2007; Berghage, Beattie, et al., 2009). Contrario a lo anterior, otras fuentes afirman que los techos verdes son efectivos al momento de reducir volúmenes generales de escorrentía, sin embargo no son muy buenos para reducir el flujo pico de la tormenta (Mentens, Raes, et al., 2006) cuando se trata de eventos grandes, y que los techos verdes actúan principalmente como instrumento retenedores de agua, antes que detenerlas y liberarlas gradualmente (Carter and Rasmussen, 2007).

Entre más fuerte sea la tormenta menor será la cantidad de agua que el techo puede retener (Dunnett and Clayden, 2007; Carter and Rasmussen, 2007), y una vez el techo completa su capacidad de almacenamiento el agua simplemente fluye (Dunnett and Clayden, 2007; Berghage, Beattie, et al., 2009). La duración de las tormentas también incide sobre la capacidad de retención del techo verde (Carter and Rasmussen, 2007; Berghage, Beattie, et al., 2009a).

La capacidad de almacenamiento de un techo verde varía dependiendo de la época del año, la profundidad del sustrato, el número y tipo de capas usadas en su construcción, la pendiente del techo, las propiedades físicas del sustrato, el tipo de vegetación incorporada (Dunnett and Clayden, 2007), la intensidad de la lluvia y el clima local (Dunnett and Clayden, 2007; Berghage, Beattie, et al., 2009a; Devia, Puentes, et al., 2011). Para una segunda fuente está determinada principalmente por el tipo de techo verde, la precipitación anual, el número de capas, la profundidad del sustrato, condiciones climáticas y cantidad de precipitación, mientras que características como la edad del techo, el ángulo de pendiente y la longitud del techo no tienen relación directa con la cantidad de escorrentía (Mentens, Raes, et al., 2006).

Otras de las fuentes consultadas indican que la capacidad de almacenamiento de un techo verde es función de la cantidad de precipitación, el estado de saturación del suelo previo al evento de precipitación (Carter and Rasmussen, 2007), mientras que para ciertas

condiciones climáticas, la profundidad del sustrato y el tipo de vegetación no constituye un factor determinante (Devia, Puentes, et al., 2011).

Analizando el comportamiento del techo verde durante las estaciones, se hace evidente que el almacenamiento de agua es mucho menor en el invierno, y bastante eficiente en el verano, debido a que la temperatura en esta temporada tiene un efecto sobre el contenido de humedad del sustrato (Mentens, Raes, et al., 2006; Carter and Rasmussen, 2007; Berghage, Beattie, et al., 2009a).

Es importante no generalizar los resultados de estudios realizados en diferentes zonas, especialmente si las condiciones climáticas son distintas (Dunnnett and Clayden, 2007). Hay varias aproximaciones en cuanto al porcentaje del evento de escorrentía que puede retener un techo verde: una de las fuentes indica que para techos extensivos la retención es aproximadamente de un 45% y para intensivos de 75% (Mentens, Raes, et al., 2006), otras que está entre el 39% y el 100% con una retención promedio de 78% (Carter and Rasmussen, 2007), o entre el 6% y el 66% (Devia, Puentes, et al., 2011), o de aproximadamente un 50% (Berghage, Beattie, et al., 2009a).

El papel de las plantas en la reducción de escorrentía también es un punto de desacuerdo entre las diferentes fuentes, algunas coinciden en que es relevante ya que con ellas se obtiene una reducción mayor que con una capa de grava (Dunnnett and Clayden, 2007) y que algunas plantas son más efectivas que otras en cuanto a esta función y la diferencia entre estas es altamente significativa (Nagase and Dunnnett, 2012). Por ejemplo los pastos son las plantas más efectivas para captación de agua, seguidas de las hierbas y los sedum (Nagase and Dunnnett, 2012). Contrario a lo anterior hay fuentes y estudios que indican que un sustrato sin vegetación captura la misma o mayor cantidad de agua que con ella, durante periodos húmedos (Berghage, Beattie, et al., 2009a; Devia, Puentes, et al., 2011), por lo que la función de esta en el techo verde es ornamental (Berghage, Beattie, et al., 2009a).

Algo similar ocurre con la pendiente de la cubierta, algunos estudios indican que no incide en el comportamiento hidrológico del techo verde, sin embargo un estudio realizado en la universidad de Michigan demostró que a medida que se incrementa la pendiente del techo verde la capacidad de retención de agua disminuye. Se destaca que esos resultados aplican únicamente para zonas con condiciones climáticas similares (Getter, Rowe, et al., 2007).

6.5 Calidad del agua

Con respecto a la calidad del agua existen diferencias en la literatura, algunas fuentes indican que los techos verdes tienen la capacidad de mejorar la calidad del agua, debido a que actúan como filtros naturales (Callaghan, Peck, et al., 1999; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b), sin embargo otras, principalmente resultados de estudios, aseguran que estos no proveen remoción activa de contaminantes, partículas suspendidas, fósforo o nitrógeno (North Carolina Division of Water Quality, 2007; Berndtsson, Bengtsson, et al., 2009).

Estudios realizados demuestran que al comparar la escorrentía de los techos verdes con la de una cubierta impermeabilizada con asfalto, los primeros se convierten en una fuente que aporta nutrientes al agua, como fósforo y nitrógeno (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; Berghage, Beattie, et al., 2009a; Gregoire and Clausen, 2011). Los principales componentes del techo verde causantes de este aporte son el fertilizante y el medio de crecimiento (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; Berndtsson, Bengtsson, et al., 2009; Gregoire and Clausen, 2011). También pueden causar inconvenientes productos tóxicos que se empleen durante la jardinería o productos empleados para combatir plagas (Berndtsson, Bengtsson, et al., 2009; Luckett, 2009).

Aunque la concentración de contaminantes es mayor en las aguas de escorrentía de los techos verdes que en la cubierta asfaltada, la carga total que se libera al alcantarillado no siempre será así, ya que la escorrentía total es menor en los primeros (Berghage, Beattie, et al., 2009a). Un estudio compara el contenido de contaminantes del agua de escorrentía de techos verdes con la de escorrentía urbana en general, encontrando que el de los techos verdes está por debajo, lo que constituye un punto a favor, sumándoles su capacidad de reducir el volumen de escorrentía (Berndtsson, Bengtsson, et al., 2009).

Algunos de los iones tienen concentraciones diferentes dependiendo de la temporada del año, debido a la variación de la precipitación y la disminución de la escorrentía en los meses calientes (Berghage, Beattie, et al., 2009a), en otras palabras, la variación de la concentración depende de la cantidad de precipitación retenida, y la cantidad de escorrentía de los techos.

Por otra parte, el estudio realizado por Berghage et al. (2009) comprobó que los techos vegetados generan menores cargas de nutrientes que aquellos en los que no se ha instalado la vegetación, al igual que un techo nuevo ocasiona mayores cargas de nutrientes que aquellos que son más antiguos, y en los cuales la vegetación ya se ha establecido.

Si el objetivo que se persigue al instalar el techo verde es el tratamiento del agua lluvia, se recomienda alternar este sistema con técnicas de tratamiento de agua (Berghage, Beattie,

et al., 2009a), seleccionar una vegetación que optimice la absorción de nutrientes, puede reducir la cantidad de contaminantes en la escorrentía, y en lo posible eliminar el uso de fertilizantes (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007). En términos generales, no se recomienda la implementación de techos verdes como sistemas para mejorar la calidad del agua de escorrentía (Berndtsson, Bengtsson, et al., 2009).

6.6 Calidad del aire

Los techos verdes tienen la capacidad de remover contaminantes presentes en el aire, lo cual depende principalmente de las características de vegetación, la concentración de contaminantes, las condiciones climáticas, la velocidad con que se deposite el material particulado que a su vez dependerá del tamaño de las partículas (J. Yang, Yu, et al., 2008), la posición del techo verde y las condiciones de flujo de aire (Jian-feng Li, Wai, et al., 2010).

Las plantas absorben contaminantes a través de sus estomas, interceptan partículas de materia con sus hojas, son capaces de descomponer ciertos compuestos orgánicos e indirectamente reducen la contaminación al enfriar la superficie, lo que reduce las reacciones fotoquímicas (Callaghan, Peck, et al., 1999; Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; Rowe, 2011). La mayor remoción de contaminantes se presenta cuando las hojas se encuentran totalmente abiertas y la mínima cuando la vegetación está cubierta de nieve (J. Yang, Yu, et al., 2008).

Los techos verdes reducen gran cantidad de contaminantes en la atmósfera, aunque hay métodos más eficientes y económicos que este, por ejemplo un estudio realizado en el año de 1994 muestra que un árbol mediano puede capturar la misma cantidad de contaminantes que 19 metros cuadrados de techo verde extensivo. Sin embargo si se adiciona ésta característica a los demás beneficios que trae su implementación, la inversión se justifica (J. Yang, Yu, et al., 2008), y más aun si se tiene en cuenta que los techos son un espacio inutilizado en la ciudad, y que muchas veces no se cuenta con el área necesaria para instalar árboles (Rowe, 2011).

La reducción de la concentración de Dióxido de carbono depende de la condición de la vegetación (Oberndorfer, Lundholm, et al., 2007; Jian-feng Li, Wai, et al., 2010), este proceso se realiza de dos formas: la primera corresponde a la captura por parte de las plantas para realizar su fotosíntesis y la segunda a la reducción de las necesidades energéticas de las edificaciones aislándolas térmicamente y mitigando el efecto isla de calor (Rowe, 2011). La razón por la que se logra una disminución en la concentración de carbono se debe a que la cantidad de CO₂ que absorbe una planta en el día es mayor que

la que emite en la noche, a menos que haya vientos fuertes, en este caso la absorción y la emisión son prácticamente iguales (Jian-feng Li, Wai, et al., 2010).

Árboles y arbustos son más eficientes removiendo contaminantes en el aire que plantas herbáceas o perennes, sin embargo estas últimas superan a las plantas caducifolias (Rowe, 2011).

Se estima que dos mil metros cuadrados de techo verde pueden reducir hasta cuatro mil kilogramos de material particulado al año (Callaghan, Peck, et al., 1999; Rowe, 2011). Sin embargo por la emisión de polen y partículas erosionadas del sustrato los techos verdes también pueden convertirse en fuentes contaminantes (J. Yang, Yu, et al., 2008).

7 Oportunidades de investigación

Durante el desarrollo de este trabajo se identificaron algunos temas que deben ser tenidos en cuenta para el desarrollo de futuras investigaciones.

Políticas e incentivos a nivel nacional e internacional para la instalación de techos verdes

Elaborar un plan de acción donde se establezcan las metas a alcanzar a nivel ambiental y las estrategias a implementar para lograrlas. Se debe plantear una metodología adecuada para promover la construcción de SUDS en Colombia, que sea acorde con las condiciones culturales del país.

Con base en lo estudiado algunas de las estrategias recomendadas para el desarrollo de la mencionada metodología son: la creación de una organización o comité que se encargue específicamente de la promoción de SUDS, que a la vez ofrezca asesoría sobre temas técnicos y constructivos y realice interventoría a los sistemas instalados con el fin de garantizar la calidad. Que los techos verdes que se instalen en edificaciones de carácter público sean demostrativos, es decir que sean utilizados por instituciones para el desarrollo de investigaciones. Se puede implementar también un sistema de incentivos, ya sean directos o indirectos, y una vez popularizados los techos verdes estos pueden reemplazarse por acceso a subsidios o sistemas de financiación. Además se pueden realizar modificaciones los códigos, exigiendo la construcción de techos verdes como medida compensatoria a una intervención que genere un impacto ambiental significativo, o simplemente requiriendo la obligatoriedad de la instalación en edificaciones nuevas e incluso aquellas que vayan a ser remodeladas.

Esquema arquitectónico

Validar los resultados de los estudios de comportamiento térmico de los techos verdes, para las condiciones climáticas de diferentes ciudades del país, mediante el desarrollo de un análisis de transferencia de calor, entre ellos la atmosfera y la edificación, y entre sus componentes. Además establecer en qué forma parámetros como la sombra de la vegetación, sus procesos fisiológicos, la profundidad del sustrato, la densidad del suelo, el contenido de humedad de éste, y la temperatura, afectan la transferencia de calor.

Realizar estudios que permitan verificar la influencia de la vegetación en las propiedades de aislamiento acústico de los techos verdes.

Analizar como inciden los factores como orientación, asoleamiento, vientos, lluvia, sombras urbanas, temperaturas superficiales, humedad, contaminación ambiental, en el microclima de las cubiertas.

Esquema ambiental a escala global

Buscar materiales alternativos que sustituyan los componentes fabricados a base de polímeros, con el fin de reducir la contaminación que se genera por la fabricación de éstos. Aunque los componentes de los techos verdes se fabrican con polímero reciclado, lo ideal es conseguir que este sistema sea completamente amigable con el ambiente reduciendo, o en lo posible eliminando el impacto ambiental negativo que pueda ocasionar.

Esquema ambiental a escala local

En cuanto al diseño de techos verdes la principal falencia es que no se ha establecido una metodología que permita dimensionar sus componentes, con el fin de alcanzar un rendimiento óptimo de acuerdo con el uso para el cual se está diseñando, ya sea captación de agua lluvia, aislamiento térmico, generación de hábitat, etc. Para esto se recomienda realizar una serie de estudios que permitan establecer relaciones entre las propiedades físicas de los componentes de los techos verdes, y su respuesta con respecto al uso seleccionado.

Adaptar los métodos de cálculo de capacidad hidráulica de acuerdo a las condiciones climáticas de diferentes ciudades del país, para así poder determinar la capacidad de almacenamiento de agua de un techo verde con base en sus propiedades y cómo éste influye en la escorrentía de aguas lluvias a nivel local. Además se debe establecer la relación de la capacidad de almacenamiento con parámetros como, la precipitación anual, la profundidad del sustrato, el estado de saturación del suelo, el tipo de vegetación, la pendiente del techo verdes, entre otros.

Determinar mediante modelación la influencia de la implementación de techos verdes en la calidad del aire tomando como base las condiciones climáticas de cada ciudad y el grado de contaminación del aire en cada una de ellas. Se recomienda la modelación debido a que es necesario partir del supuesto de una cierta cantidad de área cubierta por techos verdes, para obtener resultados que representen cambios significativos en cuanto al mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad.

Estudiar el comportamiento hidrológico de los techos verdes bajo las diferentes condiciones climáticas que ofrece nuestro país, para así establecer cuál es su aporte real en cuanto a la atenuación de la escorrentía de aguas lluvias, y si las condiciones climáticas locales inciden negativamente en la calidad del agua como ocurre en algunas regiones del mundo.

Evaluar la capacidad que tienen los techos verdes para la remoción de contaminantes como sólidos en suspensión, metales pesados u otros tipos de contaminantes. Además estudiar la posibilidad de potenciar el efecto de mejoramiento de la calidad del agua,

mediante la reducción del aporte de nutrientes al agua de escorrentía con la implementación de técnicas de fertirrigación.

Diseñar una metodología de cálculo estructural para techos verdes, que garantice el cumplimiento de las especificaciones dadas en la norma sismo resistente NSR-10.

En la literatura no hay claridad si la vegetación tiene incidencia en la capacidad de almacenamiento de agua de los techos verdes. Otra de las incertidumbres es en cuanto al contenido de materia orgánica que debe tener el sustrato, y al espesor que se recomienda al momento de la instalación. También hay diferencia en cuanto a la carga generada por la nieve ya que no es claro si considerarla como carga viva o como muerta. Finalmente las publicaciones difieren en las características que pueden influir en el comportamiento hidrológico de los techos verdes y su respuesta ante a los picos de las tormentas.

8 Referencias bibliográficas

Afrin, S. (2009) Green Skyscraper: Integration of Plants into Skyscrapers. Tesis de maestría. Kungliga Tekniska högskolan. Estocolmo.

Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (2010a) Construcción Sustentable. Del gris al verde. Promoción de cubiertas verdes en la Ciudad de Buenos Aires. [online] http://estatico.buenosaires.gov.ar/areas/med_ambiente/apra/des_sust/archivos/construccion/cubiertas_verdes.pdf.

Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (2010b) Resolución N° 175-APRA/10.

Alexandri, E. and Jones, P. (2008) Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, **43**(4), 480-493.

AMEC Earth and Environmental, Center for Watershed Protection, Debo and Associates, Jones, J., and Atlanta Regional Commission (2001) *Georgia Stormwater Management Manual*.

Asamblea Legislativa del Distrito Federal V Legislatura (2010) *Código Fiscal del Distrito Federal, artículo 296 Bis*.

Barrio, E. P. D. (1998) Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, **27**(2), 179-193.

Baumann, N. (2006) Ground-Nesting Birds on Green Roofs in Switzerland: Preliminary Observations. *Urban Habitats*, **4**, 37-50.

Berghage, R. R. D., Beattie, D., Jarrett, A. R., Thuring, C., Razaei, F., The Pennsylvania State University, and University Park, PA 16802 (2009a) Green Roofs for Stormwater Runoff Control.[Online] <http://nepis.epa.gov>

Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., and Jinno, K. (2009) Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, **35**(3), 369-380.

Bianchini, F. and Hewage, K. (2012) How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, **48**(0), 57-65.

Bjerregaard, R., Bondam, K., Kjeldgaard, B. A., Lønborg, M., Allerslev, P., Warming, M., and Hougaard, J. (2009) *Plan Climático de Copenhague. La versión corta. Ciudad neutra en carbono en el año 2025. Copenhague*, Copenhague, Nordic ecolabel. [online] <http://www.kk.dk/sitecore/content/Subsites/CityOfCopenhagen/SubsiteFrontpage/LivingInCopenhagen/~media/F107AAA2ED9F467A954F8C814B3EB1EF.ashx>.

Callaghan, C., Peck, S. W., Kuhn, M. E., B.E.S., B. Arch, O.A.A., Brad Bass, PhD., and

Environmental Adaptation Research Group (1999) *Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada*, Canada.

Carter, T. L. and Rasmussen, T. C. (2007) Hydrologic behavior of vegetated roofs. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **42**(5), 1261-1274.

Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., and Davison, J. B. (2010) Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, **42**(10), 1582-1591.

Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment (2000a) *Maryland stormwater desing manual*.

Center For Watershed Protection and Maryland Department Of The Environment (2000b) *Maryland stormwater desing manual Supplement No. 1*.

City of Chicago (2010) Green Roof Grants Programs. [online] http://www.cityofchicago.org/content/city/en/depts/dae/supp_info/green_roof_grantsprograms.html (Accessed March 15, 2012).

City of Copenhagen (2010) *Guidelines on green roofs adopted by the Technical and Environmental Committee on 17 May 2010*, [online] <http://www.kk.dk/sitecore/content/Subsites/CityOfCopenhagen/SubsiteFrontpage/LivingInCopenhagen/ClimateAndEnvironment/GreenRoofs/~media/D965701DD0334A4B8A1EE113D996002D.ashx>.

City of New York (2010) *NYC Green Roof Property Tax Abatement Program*, [online] http://www.nyc.gov/html/dob/downloads/pdf/green_roof_tax_abatement_info.pdf.

City of New York (2011) PlaNYC 2030. [online] <http://www.nyc.gov/html/planyc2030/html/theplan/the-plan.shtml> (Accessed March 15, 2012).

City of Sydney Local Government (2007) Environmental Management Plan. [online] <http://www.cityofsydney.nsw.gov.au/Environment/Overview/EnvironmentalManagementPlan.asp>.

City of Sydney Local Government (2010) Environmental Targets, City of Sydney. [online] <http://www.cityofsydney.nsw.gov.au/Environment/Overview/Targets.asp> (Accessed March 15, 2012).

City of Toronto (2010) *greenroof bylaw*, [online] <http://www.toronto.ca/greenroofs/overview.htm>.

City of Toronto (2011) Live Green Toronto. [online] http://www.toronto.ca/livegreen/greenbusiness_greenroofs_eco-roof.htm (Accessed March 15, 2012).

City of Vancouver (2009) Greenest City 2020 Action plan. [online] <http://vancouver.ca/greenestcity/PDF/GC2020ActionPlan.pdf>.

Cleveland, C. J. and Morris, Christopher (2009) *Dictionary of Energy (Expanded Edition)*.

Concejo de Bogotá, D. C. (2009) *Por el cual se promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables, como techos o terrazas verdes, entre otras en el D. C. y se dictan otras disposiciones*.

Cook-Patton, S. C. and Bauerle, T. L. (2012) Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *Journal of Environmental Management*, **106**, 85-92.

Departamento de Construcción Ciudad de Basilea (2012) Dachbegrünung ökologisch optimiert und naturnah - Planung - Objektplanung - Ausschreibungsvorgaben. [online] <http://www.naturdach.ch/planung/objektplanung/ausschreibungsvorgaben> (Accessed March 15, 2012).

Department of Planning of South Australia (2010) The 30 years Plan for Greater Adelaide. [online] http://www.dplg.sa.gov.au/plan4adelaide/html/files/plan/The_30-Year_Plan_for_Greater_Adelaide.pdf.

Devia, C., Puentes, A., Oviedo, N., Torres, A., and Angarita, H. (2011) "Cubiertas verdes u dinámica hídrica en la ciudad" in San José, Costa Rica. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica.

Dunnett, N. and Clayden, A. (2007) *Rain Gardens. Managing water sustainably in the garden and designed landscape*, Timber Press. 188 páginas.

United States. Environmental Protection Agency (2000) *Low Impact Development (LID) A Literature Review*. [online] <http://www.epa.gov/owow/NPS/lid/lid.pdf>.

Forero, C., Devia, C., Torres, A., and Mendez, S. (2011) "Diseño de ecotechos productivos para poblaciones vulnerables." 54 Congreso del sector del agua, saneamiento y ambiente. Colombia.

Francis, R. A. and Lorimer, J. (2011) Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, **92**(6), 1429-1437.

Getter, K. L., Rowe, D. B., and Andresen, J. A. (2007) Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, **31**(4), 225-231.

Greater London Authority (2009) Leading to a greener London. An environment programme for the capital. [online] <http://legacy.london.gov.uk/mayor/publications/2009/docs/leading-greener-london-300709.pdf>.

Greater London Authority (2010) The draft climate change adaptation strategy for London. [online] http://www.london.gov.uk/climatechange/sites/climatechange/staticdocs/Climate_change_adaptation.pdf.

Greater London Authority (2011) The London Plan. Spatial Development Strategy for Greater London. [online]

<http://www.london.gov.uk/sites/default/files/The%20London%20Plan%202011.pdf>.

Gregoire, B. G. and Clausen, J. C. (2011) Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, **37**(6), 963-969.

Groundwork Sheffield and Environment Agency (2011) *The GRO green roof code*, [online] <http://www.thegreenroofcentre.co.uk/Library/Default/Documents/GRO%20ONLINE.pdf>.

Hawaii Commission on Water Resource Management (2008) *A Handbook for Stormwater Reclamation and Reuse Best Management Practices in Hawaii*, [online] http://hawaii.gov/dlnr/cwrm/planning/hsrar_handbook.pdf.

International Green Roof Association (2010) Green Roofs of Plenty in Stuttgart, Germany. Global Networking for Green Roofs. [online] http://www.igra-world.com/links_and_downloads/images_dynamic/IGRA_Green_Roof_News_1_2010.pdf.

Jones, P. and Macdonald, N. (2007) Making space for unruly water: Sustainable drainage systems and the disciplining of surface runoff. *Geoforum*, **38**(3), 534-544.

Lanarc Consultants Ltd., Kerr Wood Leidal Associates Ltd., and Ngan, G. (2005) *Stormwater Source Control Design Guidelines 2005*, [online] http://www.metrovancouver.org/about/publications/Publications/Storm_Source_Control_PartI.pdf.

Lawlor, G., Currie, B. A., Doshi, H., and Wieditz, I. (2006) *Green Roofs: A Resource Manual for Municipal Policy Makers*, [online] <http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/65255.pdf?lang=en>.

Li, Jian-feng, Wai, O. W. H., Li, Y. S., Zhan, J., Ho, Y. A., Li, James, and Lam, E. (2010) Effect of green roof on ambient CO₂ concentration. *Building and Environment*, **45**(12), 2644-2651.

Livingroofs.org Ltd. (2012) Urban Heat Island Effect | Green Roof Benefits. [online] <http://livingroofs.org/2010030566/green-roof-benefits/heatisland.html> (Accessed March 15, 2012).

Luckett, K. (2009) *Green Roof Construction and Maintenance*, United States, McGraw-Hill, 208 páginas.

Mentens, J., Raes, D., and Hermy, M. (2006) Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, **77**(3), 217-226.

Metropolitan Council (2001) *Minnesota Urban Small Sites BMP Manual*, [online] <http://www.metrocouncil.org/environment/Watershed/BMP/manual.htm>.

Minnesota Stormwater Steering Committee (2008) *Minnesota Stormwater Manual*, [online] <http://www.pca.state.mn.us/index.php/view-document.html?gid=8937>.

Molineux, C. J., Fentiman, C. H., and Gange, A. C. (2009) Characterising alternative

recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. *Ecological Engineering*, **35**(10), 1507-1513.

Monsalve Sáenz, G. (1999) *Hidrología en la ingeniería*, Colombia, Escuela Colombiana de Ingeniería.

Nagase, A. and Dunnett, N. (2012) Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, **104**(3-4), 356-363.

New York Center for Watershed Protection (2003) *Stormwater Management Design Manual*, [online] http://www.dec.ny.gov/docs/water_pdf/swdmcover.pdf.

North Carolina Division of Water Quality (2007) *Stormwater Best Management Practices Manual*, [online] http://www.mcet.org/mining/environment/Toolkit/Additional%20Resources/Best%20Management%20Practices%20General/North%20Carolina%20BMPs_Part%201.pdf.

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., and Rowe, D. B. (2007) Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, **57**(10), 823-833.

Órgano del Gobierno del Distrito Federal (2008) *Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal*, [online] <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/DISTRITO%20FEDERAL/Normas/DFNORM23.pdf>.

Pascual, C. (2009) *Cubiertas Verdes*, Santiago de Chile, Facultad de arquitectura y urbanismo de la Universidad de Chile, 80 páginas.

Van Renterghem, T. and Botteldooren, D. (2008) Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. *Journal of Sound and Vibration*, **317**(3-5), 781-799.

Van Renterghem, Timothy and Botteldooren, Dick (2009) Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment*, **44**(5), 1081-1087.

Rowe, D. B. (2011) Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, **159**(8-9), 2100-2110.

Scheueller, T., Hirschman, D., Novotney, M., and Zielinski, J. (2007) *Urban Stormwater Retrofit Practices Manual 3*, [online] http://www.cwp.org/documents/cat_view/68-urban-subwatershed-restoration-manual-series/89-manual-3-urban-stormwater-retrofit-practices-manual.html.

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (2007) *Agenda Ambiental de la Ciudad de México*.

Secretaría Distrital de Ambiente, Castañeda Vega, J. M., Molina Leon, M. P., Herrera Nariño, E., Cardenas, M. A., and Ibañez, A. (2011) *Guía de techos verdes en Bogotá*,

Singapore Ministry of the Environment and Water Resources and Singapore Ministry of National Development (2009) *A lively and livelable Singapore. Strategies for sustainable growth*, [online] <http://app.mewr.gov.sg/web/Contents/ContentsSSS.aspx?ContId=1289>.

Taylor, R. (2008) Green roofs turn cities upside down. *ECOS*, **2008**(143), 18-21.

Tokyo Metropolitan Government (2007) Basic Policies for the 10-Year Project for Green Tokyo Regenerating Tokyo's Abundant Greenery. [online] http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/en/attachement/10-year_project.pdf.

United States. Environmental Protection Agency (1999) *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices*, [online] <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/guide/stormwater/>.

United States. Environmental Protection Agency (2008) *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. [online] <http://www.epa.gov/hiri/resources/compendium.htm>.

Velazquez, L. S. (2005) Organic Greenroof Architecture: Design Considerations and System Components. [online] http://www.greenroofs.com/pdfs/news-EQM_VelazquezPart2.pdf.

Vila, A., Pérez, G., Solé, C., Fernández, A. I., and Cabeza, L. F. (2012) Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs. *Building and Environment*, **48**, 101-106.

Ville de Montreal (2004) *Montreal Master Plan*, [online] http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=2762,3101662&_dad=portal&_schema=P-ORTAL.

Virginia Stormwater BMP Clearinghouse Committee (2011) *Virginia DCR stormwater desing specification No. 5. Vegetated roof*, [online] http://chesapeakestormwater.net/wp-content/uploads/downloads/2012/04/DCR-BMP-Spec-No-5_VEGETATED-ROOF_Final-Draft_v2-3_03012011.pdf.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., and Shaffer, P. (2007a) *Site handbook for the construction of SUDS*, Londres, CIRIA.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., and Shaffer, P. (2007b) *The SUDS manual*, Londres, CIRIA.

Xu, T., Sathaye, J., Akbari, H., Garg, V., and Tetali, S. (2012) Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. *Building and Environment*, **48**, 1-6.

Yang, H. S., Kang, J., and Choi, M. S. (2012) Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. *Building and Environment*, **50**(0), 44-55.

Yang, J., Yu, Q., and Gong, P. (2008) Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, **42**(31), 7266-7273.

ZinCo Cubiertas Ecologicas S.L. (2007) Sistemas para ajardinar cubiertas inclinadas.
[online] http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es/guias_tecnicas/guias/Cubiertas_inclinadas_ajardinadas.pdf.