



TESIS DE GRADO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO Y APLICACIÓN DE TECHOS VERDES

AUTOR: EDUARDO GRIMOLDI

DIRECTOR DE TESIS: ING. FÉLIX T. JONAS

2009

RESUMEN EJECUTIVO

Problemática

Los costos de la energía eléctrica y los problemas ambientales asociados frecuentemente con su generación están impulsando el desarrollo de nuevas tecnologías con el objetivo de disminuir el consumo energético. Los techos verdes, jardines que son instalados en los techos de edificios, sirven a este propósito al reducir el flujo de calor hacia el interior del edificio, reduciendo la temperatura del aire en el techo y protegiendo la membrana impermeable instalada en el mismo. El objetivo del proyecto es intentar adaptar los diseños usados en Estados Unidos y Europa a las características de la región.

Metodología

Para abordar el problema primero se debe definir un diseño para un techo verde que sea capaz de maximizar la relación costo-beneficio. Para esto se procede a estudiar la literatura existente respecto de los techos verdes. Esto permite diseñar uno que cumpla con las prácticas recomendadas, asegurando así su correcto funcionamiento. Un aspecto crucial de la adaptación de esta tecnología tiene que ver con la selección de las plantas y los materiales a utilizar. Para definir las plantas que se pueden usar en proyectos locales se obtiene la opinión de expertos paisajistas. Para los materiales el método consiste en especificar aquellos que cumplan con los estándares y características recomendadas internacionalmente. Por último, se procede a definir el diseño en base a la minimización del costo de instalación, con el fin de lograr que la tecnología sea lo más accesible posible.

Solución del Proyecto

Se consigue definir un diseño básico para un techo verde de 100m² a un costo aproximado de 166 \$/m². Este diseño usa materiales disponibles localmente y su bajo peso permite que sea instalado sin que sea necesaria la construcción de refuerzos adicionales a la estructura. La vida útil del sistema es de aproximadamente 50 años, que, junto con la disminución en la necesidad de acondicionamiento climático hacen del mismo una atractiva alternativa a los techos convencionales.

DESCRIPTOR BIBLIOGRÁFICO

En este proyecto se define el diseño básico de un techo verde capaz de reducir el consumo energético y los costos de mantenimiento de un edificio. Con el fin de facilitar su construcción y minimizar los costos de instalación, se diseña el mismo haciendo uso únicamente de material disponible en forma local. El diseño final consiste en una impermeabilización usando pintura epoxi sobre la cual se colocan membranas para protección, drenaje y filtrado. Estos materiales son cubiertos por 15 cm. de tierra de bajo peso específico la cual será usada para mantener la vegetación. Este diseño, de bajo peso, puede ser instalado en techos existentes sin la necesidad de realizar modificaciones.

RESUMEN

El objetivo de esta tesis es el de analizar los problemas existentes en la adaptación de la tecnología de los techos verdes (cubiertas ajardinadas) en la provincia de Buenos Aires. Al actuar como aislantes y como mecanismos de regulación térmica, su uso permitiría reducir el consumo de energía en los edificios, el riesgo de inundación en las áreas urbanas y el efecto *isla de calor*. Para lograr esto, es necesario obtener un diseño básico para un techo verde, de bajo peso y costo, y que use únicamente materiales disponibles en la región para su construcción.

El primer paso del estudio es el de definir los componentes de un techo verde, los materiales que se pueden utilizar, y las características que debe tener cada componente para que el sistema funcione correctamente. Para lograr esto, se analiza la literatura existente, incluyendo los lineamientos y las prácticas recomendadas en diversos estudios.

En segundo lugar, se define un sistema que cumpla con este criterio y que pueda ser construido usando materiales disponibles localmente. Para esto se definen distintas alternativas para cada componente del sistema, que luego son usadas para definir la composición final en base a la mejor relación costo-beneficio.

Finalmente se obtiene un costo y un peso estimado para el diseño elegido. Debido a la naturaleza genérica del diseño, los valores obtenidos pueden ser usados en la evaluación de proyectos y estudios futuros, facilitando así el trabajo de futuros proyectistas.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to analyze the existing problems encountered when trying to adapt the green roof technology in the province of Buenos Aires. Acting as insulators and as temperature control mechanisms, their use would reduce energy consumption in buildings, flood risks in urban areas and the *heat island* effect. To accomplish this task, it's necessary to create a basic design for a green roof that is lightweight and inexpensive, and that can be built using materials available locally.

The first step in this study is to define the components of a green roof, the materials that can be used and the characteristics they must have to ensure that the system will function correctly. To do this, the existing literature is analyzed, including guidelines and recommended practices detailed in several studies.

In second place, a system that can be built using local materials and that meets all these criteria is defined. In order to do this, alternatives for each component are analyzed. The ones that maximize the cost-benefit ratio are then selected.

Finally, an estimated cost and structural load is obtained for the design. Due to their generic nature, the values obtained are intended to be used as guidelines for future studies and projects.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. HISTORIA DE LOS TECHOS VERDES.....	1
1.2. BENEFICIOS	5
2. BENEFICIOS DEL SISTEMA.....	7
2.1. MANEJO DEL AGUA DE LLUVIA.....	7
2.2. EFECTOS SOBRE EL CONSUMO ENERGÉTICO	10
2.3. REDUCCIÓN DEL EFECTO “ISLA DE CALOR”.....	13
2.4. EFECTOS SOBRE LA DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES	14
3. CUANTIFICACIÓN DE LOS BENEFICIOS	15
3.1. MANEJO DEL AGUA DE LLUVIA.....	15
3.1.1. Retención del agua de lluvia	15
3.1.2. Reducción del flujo máximo.....	18
3.2. EFECTOS SOBRE EL CONSUMO ENERGÉTICO	19
3.2.1. Estimación del ahorro energético	23

3.3.	EFFECTOS SOBRE LA DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES	25
4.	DISEÑO.....	28
4.1.	REQUISITOS	28
4.2.	ESTRUCTURA BÁSICA.....	29
4.2.1.	Consideraciones generales	32
4.3.	MEMBRANAS IMPERMEABLES	33
4.4.	CAPA DE DRENAJE.....	34
4.5.	MEMBRANA FILTRANTE	37
4.6.	MEMBRANA DE PROTECCIÓN.....	38
4.7.	SUSTRATO DE CRECIMIENTO.....	38
4.8.	ELECCIÓN DE PLANTAS.....	39
4.8.1.	Mesembryanthemum Edule (uña de gato)	40
4.8.2.	Sedum Acre.....	41
4.8.3.	Carex Broncina y Stipa Tenuissima.....	41
4.8.4.	Césped	42
4.9.	SISTEMA MODULAR.....	43

5.	COSTOS	46
5.1.	COSTO DE LAS PLANTAS	46
5.1.1.	Uña de Gato (Mesembryanthemum Edule)	47
5.1.2.	Sedum Acre.....	47
5.1.3.	Carex Broncina y Stipa Tenuissima.....	47
5.1.4.	Césped	48
5.1.5.	Sustrato de crecimiento	49
5.1.6.	Costo total por planta	49
5.2.	COSTO DE LAS MEMBRANAS.....	50
5.3.	COSTO FINAL DEL TECHO VERDE.....	51
6.	REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES.....	53
7.	CONCLUSIÓN	54
7.1.	ESTUDIOS FUTUROS.....	55
8.	ANEXO.....	57
8.1.	ANEXO I: INCREMENTO EN EL NÚMERO DE TECHOS VERDES CONSTRUIDOS	57

8.2.	ANEXO II: ALBEDO DE DISTINTAS SUPERFICIES.....	58
8.3.	ANEXO III: MITIGACIÓN DEL EFECTO ISLA DE CALOR.....	59
8.4.	ANEXO IV: ESTUDIO DE LA TEMPERATURA DE LA MEMBRANA IMPERMEABLE.....	60
8.5.	ANEXO V: EDIFICIO ESTUDIADO EN LA INVESTIGACIÓN DE BASS & BASKARAN.....	60
8.6.	ANEXO VI: SISTEMAS MODULARES GREENTECH (TM).....	61
8.7.	ANEXO VII: INFORMACIÓN TÉCNICA DE LAS PLACAS DE DRENAJE Y MEMBRANAS GEOTEXTILES.....	63
8.8.	ANEXO VIII: PLANTAS USADAS FRECUENTEMENTE EN TECHOS VERDES.....	65
8.9.	ANEXO IX: MEDIDAS DE PROMOCIÓN DE TECHOS VERDES.....	65
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	68

1. INTRODUCCIÓN

Los techos verdes o “eco-techos” son techos que tienen incorporado un área en la que puede permanecer y mantenerse un jardín durante una cantidad de tiempo indefinida. Estos tipos de techo se dividen principalmente en dos tipos: intensivo y extensivo, difiriendo principalmente en el tipo de plantas que se usan y al esfuerzo estructural al que someten la estructura. Los del tipo intensivo son generalmente accesibles y tienen un rango de plantas más similar a las de un jardín tradicional, como pasto, arbustos y árboles. Debido a la naturaleza de las plantas que alojan requieren una mayor cantidad de tierra (unos 30cm de profundidad) lo cual, sumado el peso de las plantas, llega a sumar una carga en la estructura de alrededor de entre 290 y 970 kg/m² [Oberndorfer et al., 2007]. Estas cubiertas pueden ser utilizadas para crecer alimentos y existen varios proyectos para difundir esta práctica en las terrazas y techos de los edificios. De esta manera se reduciría la cadena de aprovisionamiento de alimentos de forma extraordinaria, si es que se puede lograr esto en la escala suficiente y con costos proporcionados. Los de tipo extensivo alojan plantas pequeñas, frecuentemente no más que algún tipo de pasto. Su propósito es el de obtener los beneficios del sistema, minimizando los costos y las cargas estructurales. Este trabajo se concentra en este último tipo ya que es el de mayor interés en el ámbito de la ingeniería ya que logra la mejor relación costo-beneficio.

1.1. *HISTORIA DE LOS TECHOS VERDES*

Si bien el uso de los techos verdes se ha popularizado en los últimos años, han existido desde hace mucho tiempo, siendo muy prominentes en casas rurales de Europa (ver Figura 1.1) durante la edad media debido a la disponibilidad y el bajo costo de los materiales. Antes de la era industrial la gente no tenía el acceso a los materiales de construcción actuales, como el asfalto. Ante la escasez de estos recursos, los techos eran construidos con el material que se encontraba a mano. El uso de mantos de pasto, con propiedades aislantes era una buena opción ya que ayudaba a mantener la casa fresca durante el verano e impedía la fuga de calor durante el invierno. Con el paso del tiempo, esta práctica se fue reemplazando por el uso de materiales como las tejas de cerámica.



Figura 1.1-1: Construcciones rurales con techos verdes en Europa.

Sin embargo, hace unos años se comenzaron a publicar estudios y artículos evaluando los beneficios de los techos ajardinados, particularmente en Alemania. Es en 1961 que Reinhard Bornkamm, un investigador de la Universidad Libre de Berlín, publica sus estudios sobre techos verdes. En los años siguientes comenzaría el estudio de techos verdes y otras construcciones ecológicas en Berlín de la mano de Bornkamm y el Dr. Herbert Sukopp. Eventualmente, debido al incremento en investigaciones, proyectos y al número de empresas interesándose por este nuevo negocio se funda en 1975 la sociedad para el Desarrollo de Paisajes y Diseño de Paisajes (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau o FLL) para desarrollar estándares para la construcción de techos verdes.



Figura 1.1-2: Hundertwasserhaus, Austria.

Actualmente se estima que entre un 7 y un 10% de los techos de Alemania están ajardinados (ver Anexo I) [Bass & Baskaran, 2003]. En algunas ciudades este porcentaje es mayor debido a incentivos económicos ofrecidos por el gobierno en forma de subsidios o de recortes impositivos. Actualmente esta tecnología continua ganando fuerza en Europa y en Estados Unidos, particularmente en ciudades como Chicago, Portland y Atlanta. Han surgido en los últimos años un gran número de empresas dedicadas a la construcción y desarrollo de techos ajardinados, como Liveroof, Living Roofs y Roofscapes. En Estados Unidos, el programa LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) clasifica a las construcciones con un sistema de puntos orientado a favorecer los diseños sustentables que resulten en un menor y más eficiente uso de energía y de materiales. Este sistema permite identificar edificios en los cuales se considera que el ambiente de trabajo es más saludable y los costos de mantenimiento son menores. Algunas ciudades y estados de ese país ofrecen incentivos económicos para la construcción de edificios certificables. Este programa ha sido asimilado por varios países para ayudar a impulsar la construcción de edificios ecológicos en un esfuerzo por promover el uso racional de la energía y mejorar el manejo del agua de lluvia.

En este momento hay un número creciente de edificios con techos verdes (ver Anexo I). Han sido instalados en hoteles, fábricas, edificios de oficina, casas e incluso paradas de buses. Las razones para crear un techo verde pueden variar de caso a caso. En algunos casos se trata de un esfuerzo por embellecer el paisaje urbano o el mismo edificio, mientras que en otros las razones son económicas o ecológicas, incluso en algunos casos se han creado para satisfacer las demandas alimenticias de los habitantes, como es el caso del hotel Fairmont Waterfront en Vancouver, donde se cosechan vegetales, frutas e incluso se produce miel [Fairmont, 2009]. Algunos casos más son, por ejemplo, el techo de la municipalidad de Chicago (Chicago City Hall), la planta River Rouge de Ford en Michigan, la academia de ciencias de California, el edificio de Siemens en Düsseldorf y muchos otros más.



Figura 1.1-3: Edificio Siemens, Düsseldorf – Stuttgart, Alemania



Figura 1.1-4: Chicago City Hall, Chicago

Para cubrir la creciente demanda de techos verdes se han creado varias empresas tanto en Europa como en Estados Unidos dedicadas al diseño y construcción de cubiertas ajardinadas lo cual tiende a aumentar la calidad de los diseños y de los productos ofrecidos. Sin embargo, el marco regulatorio para estas construcciones es aun incierto e incompleto, pero este suele ser el caso cuando una tecnología nueva se comienza a popularizar. Hasta que no alcanza una cierta masa crítica, la misma escapa durante un tiempo al dictamen de leyes.

1.2. BENEFICIOS

Los beneficios producidos por un techo verde son muy numerosos. En algunos casos son el resultado directo de alguna propiedad de la estructura (por ejemplo, aislamiento acústico) y en otros se debe a la interacción de distintos elementos. Uno de los beneficios principales o uno de los más significativos es el de la reducción de la cantidad de calor absorbido por el edificio durante los días calurosos. En estos días, la temperatura de un techo con jardín será menor que la de uno con las estructuras convencionales lo cual ayuda a mantener el interior del edificio fresco. Sin embargo, esto no se traduce en una pérdida de calor en los días fríos por razones que se explicarán más adelante. Otro aspecto importante es el del manejo del agua de lluvia. Un techo verde actúa como un filtro orgánico del agua de lluvia pero más importante aun es que retarda la evacuación de esta agua. De esta manera, un edificio con un techo verde drena el agua de lluvia en desfase a aquellos con techos convencionales, lo cual en algunos casos puede evitar la saturación del sistema de drenaje pluvial [Liesecke, 1999; Schade, 2000; Moran, 2004; Bass & Baskaran, 2003; Rosenzweig et al., 2006a]. En definitiva, reduce y retarda el volumen de agua de lluvia que sale del edificio. Una lista de estos y otros beneficios se encuentra a continuación:

- Amortiguación de las variaciones térmicas que experimenta el edificio.
- Aumento en la absorción del sonido proveniente del exterior, reduciendo tanto la cantidad de sonido reflejado como la absorbida por el propio edificio.
- Reduce las fluctuaciones de temperatura de la membrana impermeable del techo y por lo tanto el efecto de expansión y contracción térmica.
- Aumenta la vida útil de dicha membrana.
- Reduce la temperatura del techo y el aire a su alrededor, ayudando a reducir el efecto de “isla de calor” en los centros urbanos.
- Aumenta el atractivo visual o estético del paisaje urbano.

- Mejora el tratamiento del agua de lluvia en forma pasiva.
- Aumenta el aislamiento térmico del techo, reduciendo la absorción de calor del edificio.
- Mejora la administración de los desagües pluviales.
- Crea un hábitat natural para pájaros e insectos.

En la siguiente sección se realiza un análisis más profundo de los distintos beneficios.

2. BENEFICIOS DEL SISTEMA

Como fue explicado anteriormente, los beneficios de los techos verdes son muchos y muy diversos en su naturaleza lo cual hace, por ejemplo, que sea muy difícil determinar qué efecto es el más importante en la reducción del calor dentro del edificio. Se puede hacer una distinción sin embargo, en cuanto al efecto general que producen. Para simplificar el análisis se usa esto para dividir los beneficios entre aquellos que afectan el agua de lluvia, la temperatura del edificio y por ultimo, la degradación de los materiales del edificio.

2.1. MANEJO DEL AGUA DE LLUVIA

El manejo del agua de lluvia es un problema importante en las ciudades. Al cubrir una superficie cada vez mayor con materiales impermeables como el concreto y el cemento se produce un volumen mayor de agua sucia que debe ser evacuada. Existen regulaciones a cumplir para asegurar el drenaje adecuado de las superficies donde, de lo contrario, el agua permanecería estancada. En el caso de las calles, son construidas en forma convexa con drenajes en los costados, asegurando así el desagüe de la misma. Los techos presentan el mismo problema y existen distintas formas de eliminar el agua según su diseño y características. Sin embargo, estas soluciones locales generan un problema de una escala y una complejidad mayor. La realidad es que lo que se esta haciendo verdaderamente, es encauzar toda la precipitación correspondiente a una vasta área urbana, a unos conductos y canales que en muchos casos resultan ser insuficientes. En la ciudad de Buenos Aires esto es un problema sumamente tangible, ya que las inundaciones son frecuentes y decepcionantemente predecibles [Kreimer et al., 2001]. El afán de la población por tirar basura en forma de botellas, papeles y demás directamente a la calle y a la vereda tan solo agrava el problema, ya que tapan las tomas y las cañerías, reduciendo la efectividad de las mismas, pero aun si no lo hicieran el problema seguirá existiendo. En vista de esto, no resulta factible incrementar las dimensiones, tanto de las tomas de agua, como de las mismas cañerías de desagüe, ya que implicaría la destrucción de calles y veredas a lo largo y a lo ancho de toda la ciudad. Otro enfoque posible es intentar reducir el caudal de agua que ingresa al sistema, y es esto justamente lo que logra un techo verde.

Tener un jardín en el techo de un edificio afecta substancialmente la cantidad, forma y las condiciones en las que el agua ingresa a los desagües pluviales [VanWoert et

al. 2005]. Una gran proporción del agua que recibe el jardín es retenida por la tierra y las plantas, reduciendo la cantidad de agua total que se evacua desde el techo. El agua retenida será luego utilizada para el crecimiento de las plantas o será devuelta a la atmósfera mediante la evapotranspiración. La capacidad de retener agua esta asociada al tamaño de las partículas de tierra y la profundidad de la misma. El porcentaje de la lluvia que es retenida puede ser de entre el 10 y el 100% [BES, 2004]. Esta propiedad depende entonces del diseño y las características del techo y el jardín, además de la intensidad y duración de la lluvia. Generalmente, un jardín de tipo intensivo podrá retener generalmente una mayor cantidad de agua que uno de tipo extensivo, pero todo techo verde tiene esta capacidad en mayor o menor medida. Es importante tener en cuenta el peso variable agregado por el agua al momento de determinar los esfuerzos a los que será sometido el techo.

Una porción del agua precipitada escapará del techo verde, ya sea porque su capacidad de retención ha llegado al máximo, o porque se trata de agua capturada que escapa lentamente mientras se filtra por la tierra. Esto produce una drástica reducción en el caudal de agua que es evacuada. Los techos convencionales comienzan a descargar agua en el momento de producirse la lluvia, y el caudal es casi igual al ritmo de la precipitación. Por lo contrario, un techo verde comienza a descargar una cantidad menor de agua un tiempo después de empezada la lluvia, y el caudal es menor, especialmente si la lluvia es intensa y corta, y continua haciéndolo por un periodo de tiempo mayor [Moran, 2004]. Este efecto es ilustrado a continuación en la Figura 2.1.

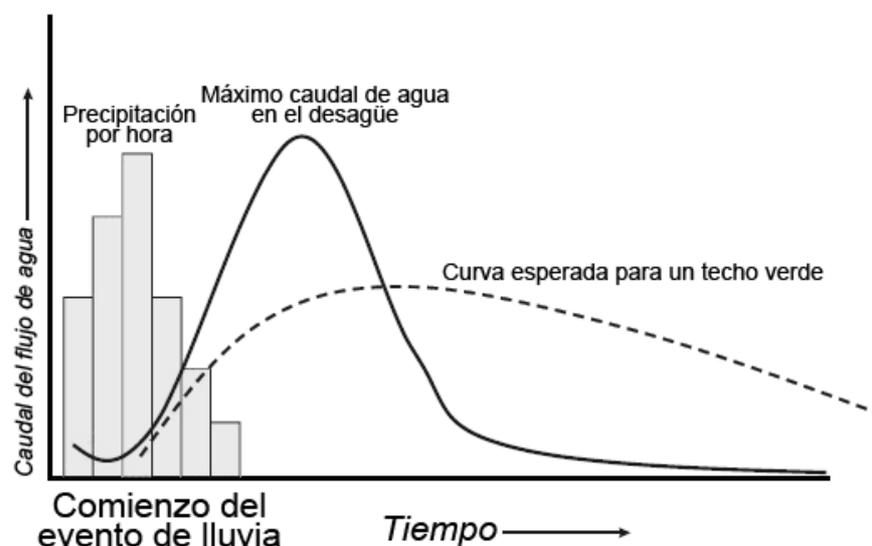


Figura 2.1-1: Hidrógrafo teórico comparando el desagüe teórico de un techo verde y un techo tradicional. Fuente: Rosenzweig et al., 2006a.

Estos efectos son el sujeto de numerosos estudios y centros de investigación y son unos de los efectos más valorados de los techos verdes. Hasta ahora se han mencionado efectos sobre el caudal y el volumen de agua desaguada, pero el sistema también afecta muchas de las características del agua, como la temperatura, el pH y los minerales disueltos en él. En un techo convencional el agua se lleva las partículas de polvo y material que se encuentran en el techo, mientras que en un techo verde se desprende de esta contaminación a medida que se filtra por la tierra. Sin embargo, es posible que arrastre consigo algo de tierra y algunos minerales.

La temperatura del agua se puede ver reducida sustancialmente ya que los techos verdes son considerablemente más fríos que los convencionales, por lo que el agua expulsada también será más fría. Esto es particularmente cierto en días calurosos, donde la temperatura de la grava o del material impermeable de un techo común puede superar la temperatura del aire que lo rodea, por lo que es posible que no solo no enfríe el agua, sino que la caliente mientras se escurre por la superficie. En el caso en que el agua de lluvia sea devuelta a algún cuerpo de agua, esta diferencia de temperatura ayuda a conservar las condiciones naturales de dichos hábitat.

La composición del agua también se ve alterada en cualquiera de los casos. Debido a la presencia de minerales y metales en la tierra, es posible que el agua que sale de un techo verde contenga mayores concentraciones de ciertos metales que en su estado original. Sin embargo, esto también ocurre en un techo convencional, especialmente si el mismo se encuentra deteriorado.

Por último, el jardín actúa como un regulador del pH del agua, ayudando a contrarrestar los efectos nocivos de la lluvia ácida. Dependiendo de la cantidad de lluvia ácida recibida, es posible que el jardín sea capaz de neutralizar la acidez de la lluvia por unos 10-20 años. Si bien esta capacidad no es permanente, es posible renovarla cuando sea necesario agregando piedra caliza [Berghage et al., 2007].

Todos estos beneficios contribuyen a hacer de esta tecnología una excelente forma de manejar la disposición del agua de lluvia. Como fue explicado anteriormente, la administración correcta de las aguas de lluvia afecta a la ciudad como un todo, y la misma se vería beneficiada por el uso extendido de esta tecnología. Sin embargo, las posibilidades del uso de techos verdes en el tratamiento de aguas aun no han sido del todo documentadas. En particular, existe la posibilidad de usar esta tecnología para el reciclaje de aguas grises utilizando una estructura escalonada con

jardines que filtren sucesivamente el agua [Water Works UK, 2009]. La implementación de estos conceptos en edificios existentes es bastante complicada pero es posible obtener grandes beneficios al incorporarlos para la construcción de edificios futuros. Un caso excepcional es el de la Hearst Tower en NYC, donde el agua de lluvia es almacenada para usarla para el sistema de enfriamiento, irrigación y para una cascada de agua en el lobby del edificio que enfría el mismo considerablemente. Si bien este edificio no tiene un techo verde, se podría usar uno para enfriar el agua de lluvia antes de usarla en algún sistema de enfriamiento similar.

2.2. EFECTOS SOBRE EL CONSUMO ENERGÉTICO

La cubierta de un edificio cumple varias funciones y su diseño varía según el enfoque de la construcción y los diversos requerimientos que sean aplicables. Principalmente, un techo cumple la función de cerramiento superior, protegiendo los espacios interiores. En su diseño y construcción se balancean consideraciones estructurales, costo de los materiales, técnica y rapidez de construcción entre otros, pero también se requiere del techo un cierto grado de aislamiento. El mismo debe proveer aislamiento térmico, hidrófugo, climático, acústico y óptico. Entre éstos, el aislamiento térmico, si bien no es tan importante como el hidrófugo, es de consideración especial ya que el 60% o más de las ganancias y pérdidas de calor se producen por la cubierta [Suman & Srivastava, 2009]. Esta transferencia tiene una relación directa en los costos de acondicionamiento del espacio interior y la estrategia convencional utilizada para mermar este porcentaje es el aislamiento utilizando algún material adecuado. El uso de hormigón pobre o de membranas permite crear una barrera aislante para impedir la transferencia de calor. En este sentido, un techo verde va un paso más allá, ya que ofrece formas diversas no solo de aislamiento, si no también de mecanismos que facilitan la pérdida de calor. Aun más notable, es que algunos de estos mecanismos son beneficiosos también en impedir la pérdida de calor durante los días fríos.

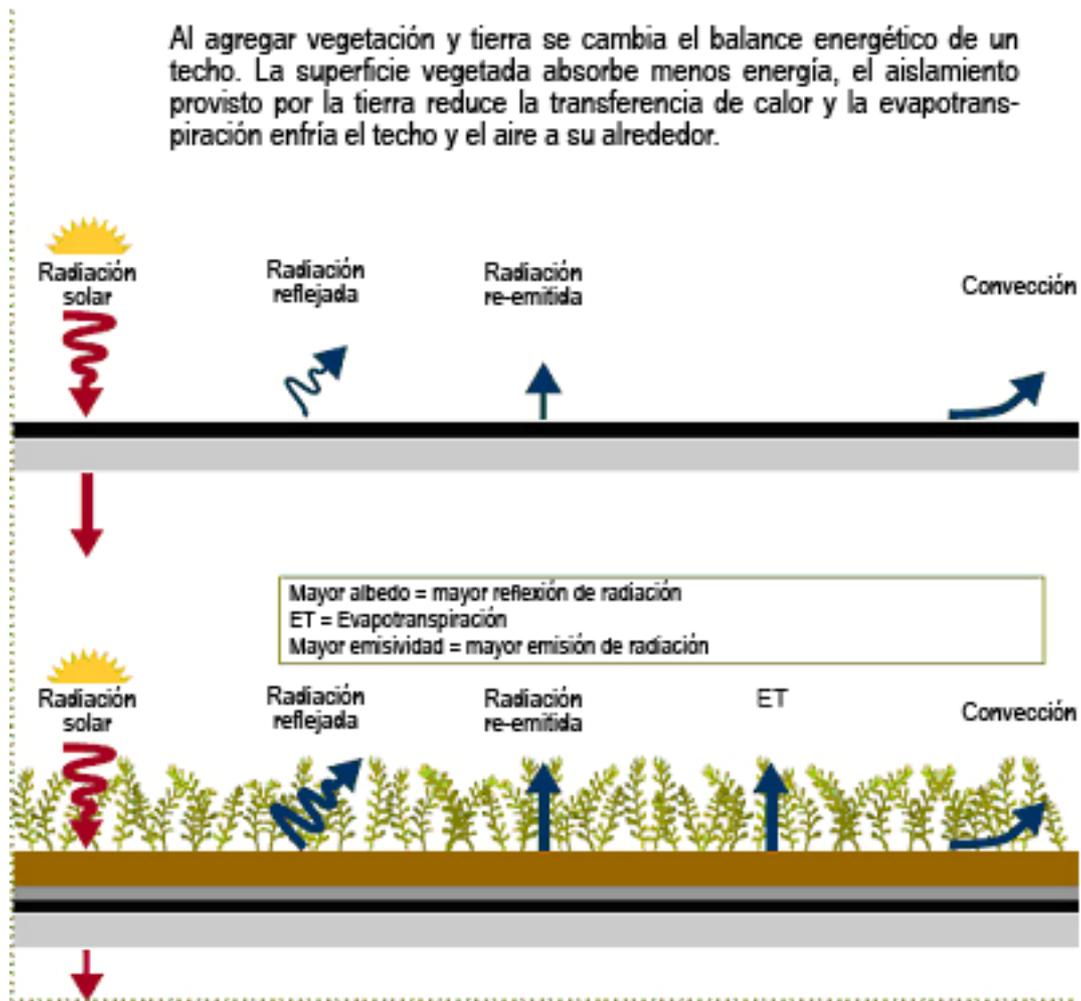


Figura 2.2-1: Esquema de las diferencias en el balance térmico entre un techo verde y uno convencional.

Los materiales presentes en un techo no metálico suelen ser oscuros, lo cual se traduce en una mayor absorción de los rayos solares y por ende una mayor absorción de calor. La solución más común a este problema es pintar el techo o usar membranas metálicas impermeables. Sin embargo, cualquiera sea la solución, el material queda totalmente expuesto y es degradado por la radiación solar, la lluvia, los cambios de temperatura y los vientos. Otra solución es el uso de bloques y losas para crear una cámara de aire, pero esto se traduce en mayores costos materiales y un techo intransitable, dificultando las tareas de mantenimiento. Un techo verde cubre la superficie con plantas, que tienen un menor albedo que muchos materiales de construcción y por lo tanto absorben menor radiación solar, lo que reduce significativamente el calor ganado por este medio (ver Anexo II). Adicionalmente, la tierra y las plantas en sí actúan como una barrera adicional de aislante térmico, ya que no conducen el calor fácilmente. Otra característica es el estancamiento del aire

a la altura de las plantas, debido a la multiplicidad de obstáculos que obstruyen su flujo (hojas, tallos, tierra). Esto crea un colchón de aire que reduce la cantidad de calor transferido por convección por el aire caliente del entorno. Este efecto también ayuda a reducir la pérdida de calor en días fríos [EAD, 2007].

Quizás el fenómeno más importante en lo que respecta a las formas de perder calor es el de evapotranspiración. Esto comprende tanto el agua que reside en la superficie de las plantas y en su medio de crecimiento y que se evapora a la atmósfera, como el agua que contienen las plantas y que transpiran a través de su superficie. Al pasar del estado líquido al gaseoso, el agua absorbe calor de su entorno, lo cual enfría las plantas, la tierra y el aire. Esto significa que, al contrario de un techo convencional que se limita a aislar el espacio interior del exterior, un techo verde pierde calor en forma activa.

La cuantificación de todos estos efectos es sumamente difícil y complicada debido a la cantidad de variables que se deben tener en cuenta. Resulta casi imposible distinguir cuánto contribuye cada mecanismo a mantener fresco el interior del edificio. Es por esto que la mayoría de los estudios sobre los techos verdes evalúan los efectos conjuntos, ya que no es necesario saber qué factor influye más para obtener los beneficios de su implementación. Sin embargo, se cree que el efecto de la evapotranspiración es uno de los más importantes. Un estudio ha podido cuantificar la cantidad de agua involucrada en este proceso, lo cual quizás permitiría cuantificar el efecto con un experimento que simule el proceso en forma aislada [Berghage et al., 2007].



Figura 2.2-2: Diferencia en la temperatura superficial entre un techo verde y uno convencional. (Fuente: Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires)

Es posible que se pueda obtener un beneficio aun mayor de este sistema si los equipos de aire acondicionado (en particular la toma de aire exterior) se ubican en, o cerca del jardín. Al estar el aire a una menor temperatura que el de un techo normal, la diferencia entre esta temperatura y la deseada es menor, lo cual se traduce en un ahorro cuantificable en la cantidad de energía utilizada por el sistema de aire acondicionado. Esto demuestra la importancia del diseño racional utilizando este beneficio “pasivo”, ya que el provecho que se saque del sistema, no depende sólo del propio sistema, si no del grado de utilización y la creatividad con la que se integre éste a las necesidades del edificio.

2.3. REDUCCIÓN DEL EFECTO “ISLA DE CALOR”

Los techos verdes pueden, de ser implementados en escala suficiente, tener efectos dramáticos sobre la temperatura promedio de una ciudad. El efecto llamado “Isla de Calor” es un fenómeno que se presenta en áreas urbanas e involucra el aumento de la temperatura ambiente respecto de las zonas circundantes. Esto se debe principalmente a las diferentes propiedades de absorción y radiación térmica y las características superficiales, como el albedo de los materiales presentes en los centros urbanos respecto de los encontrados en zonas rurales.

Existen dos estrategias básicas que se pueden usar para mitigar estos efectos [Rosenzweig et al., 2006b]:

- Incrementar la reflectividad de las superficies (albedo).

- Incrementar la densidad de la vegetación.

Es importante notar que en ciudades donde hay muy poco espacio para plantar vegetación, los techos verdes pueden ser utilizados sin problemas. Se han realizado varios estudios que muestran que el uso de techos verdes sería sumamente efectivo en la reducción de este fenómeno. Una simulación sobre el uso de techos verdes en Toronto encontró que de instalar jardines en el 50% de los techos, reduciría en 0.1-0.8°C el efecto isla de calor durante el verano, cuya magnitud es de 2-3°C [Bass et al., 2003]. Hay que tener en cuenta que si bien este efecto parece pequeño, el ahorro energético, y por lo tanto económico y ecológico sería sustancial. En el Anexo III se encuentran algunas tablas que ilustran el potencial de ahorro y reducción de la temperatura urbana de varias medidas de mitigación.

2.4. EFECTOS SOBRE LA DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES

Al construir un jardín sobre la superficie del techo, se provee una protección muy útil a los materiales debajo del mismo. Los efectos mencionados anteriormente reducen las solicitaciones térmicas al amortiguar y reducir las variaciones de temperatura. Esto, junto con la eliminación absoluta de la incidencia de rayos ultravioletas sobre los materiales impermeables, ayuda a alargar la vida útil de éstos en forma notable. Se estima que el efecto de esta protección es capaz de hacer que un techo verde dure entre dos o tres veces más que un techo convencional [Peck et al., 1999; Saiz et al., 2006; Porsche and Kohler, 2003; Wong et al., 2003; Rosenzweig et al., 2006a]. En promedio, la duración de un techo verde se estima en 40 años [Bass & Baskaran, 2003]. El crecimiento de las raíces puede resultar sumamente perjudicial si estas llegan a interactuar con los materiales impermeables u otros cuyo diseño no contempla ese factor, reduciendo drásticamente la vida útil del sistema. Sin embargo, dicha interacción no debería ocurrir si se realiza el mantenimiento adecuado, y con la frecuencia recomendada para estos techos.

3. CUANTIFICACIÓN DE LOS BENEFICIOS

Ya han sido listados los beneficios de los techos verdes, y hemos explicado los mecanismos que permiten que se manifiesten. Ahora, pasaremos a cuantificar estos beneficios para luego hacer una evaluación objetiva de la relación Costo-Beneficio del sistema, y emitir así un juicio sobre su utilidad.

3.1. MANEJO DEL AGUA DE LLUVIA

Los techos verdes han sido objeto de estudio de varias publicaciones e investigaciones. En Alemania, este campo de investigación data desde 1975, con más de 950 estudios y artículos publicados, de los cuales muy pocos se encuentran disponibles en inglés [Herman, 2003]. A nivel mundial, la mayoría de los estudios se centra en el uso de estos techos para mejorar el manejo del agua de lluvia en centros urbanos. Estos estudios han podido comprobar la eficacia del sistema en forma precisa, tanto por medio de experimentos como por simulaciones.

3.1.1. Retención del agua de lluvia

Los techos verdes han demostrado ser capaces de retener más del 50% de la precipitación anual. En un estudio realizado en Alemania por el Dr. Hans-Joachim Liesecke usando techos verdes con profundidades de tierra de entre 80mm y 120mm, los mismos demostraron ser muy efectivos. Con precipitaciones de 918mm, 712mm y 827mm para 1995, 1996 y 1997 respectivamente, la retención del agua fue de entre 47% y 75% de la precipitación anual según la profundidad de la tierra [Liesecke, 1999]. Los techos utilizados durante el estudio tenían una pendiente de 5°, salvo uno que tenía una pendiente de 0°. La mayoría de los resultados de la investigación corresponden a valores de retención de entre un 50% y un 65% de las precipitaciones anuales. El jardín con menor profundidad retuvo el mínimo durante 1995, con 47% del agua retenida (431mm) y el de mayor profundidad y de 0° de pendiente, logró la máxima retención en 1996 con 74% (526mm) [Liesecke, 1999].

En otro estudio, realizado en el 2004 en Carolina del Norte, USA, los resultados fueron muy similares. El estudio utilizó 2 techos verdes instalados a aproximadamente 37km de distancia el uno del otro. El promedio de retención de la precipitación para ambos techos fue de 63% [Moran, 2004]. Se registró una variación significativa en el porcentaje de agua retenida durante los 9 meses estudiados. A continuación se presentan las tablas con la información correspondiente:

Periodo	Precipitación [mm]	Cantidad desaguada [mm]	Cantidad de agua retenida [mm]	Retención
Abril 2003	104	49	55	53%
Mayo 2003	124	64	60	48%
Junio 2003	55	10	45	82%
Julio 2003	266	124	142	53%
Agosto 2003	67	22	45	68%
Septiembre 2003	84	19	65	78%
Octubre 2003	86	21	65	75%
Noviembre 2003	31	4	27	88%
Diciembre 2003	85	32	53	62%
TOTAL	901	345	556	62%

Tabla 3.1.1-1: Precipitación retenida en el techo verde en WCC, Goldsboro, NC.
Fuente: Moran, 2004.

En Noviembre de 2003 la precipitación total fue de 31mm, de los cuales 27mm fueron retenidos por el techo verde (88%), mientras que en Mayo del mismo año se registró un total de 124mm de lluvia y la retención fue de 64mm (48%). Para el otro techo verde utilizado en el estudio, la variación fue aun más dramática, con un porcentaje de retención de 92% para una escasa precipitación mensual de 18mm en Julio del 2003, y 45% de retención para Diciembre del mismo año, donde las lluvias totalizaron 102mm [Moran, 2004].

En este estudio se realizó también un análisis minucioso del impacto del tiempo entre lluvias, y su intensidad, en la capacidad de retención de un techo verde. La conclusión es la esperada: Cuanto mayor sea el tiempo entre lluvias, mayor será la capacidad de retención del techo para cada evento.

Por otro lado, el Penn State Center for Green Roof Research ha realizado experimentos sobre un techo verde en Pennsylvania, concluyendo que el mismo es

capaz de retener entre 50 y 60% de la precipitación anual. Los resultados confirman que la capacidad de absorción es mayor durante el verano, habiendo llegado a registrar una retención del 100% en algunos casos. El estudio concluye que en verano, un techo verde con una profundidad de 4" puede retener 1" de precipitación si la anterior lluvia ocurrió hace una semana o más [Berghage et al., 2007].

Estos estudios indican que la capacidad de retención de un techo verde es determinada por:

- Intensidad de las lluvias
- Duración de la lluvia
- Cantidad de tiempo entre lluvias
- Tasa de Evapotranspiración
- Profundidad de la tierra
- Humedad de la tierra al momento de producirse una lluvia
- Pendiente del techo

En particular, se ha demostrado de forma consistente la importancia de la evapotranspiración y la profundidad de la tierra como los factores determinantes. La evapotranspiración es el medio principal por el cual se elimina el agua presente en la tierra, y debido a que la tasa de evapotranspiración aumenta con la temperatura y la duración del día, la misma será mayor durante los meses de verano. Esto implica que el sistema será más efectivo si las lluvias son más comunes durante el verano, lo cual concuerda perfectamente con los resultados empíricos. Sin embargo, si el techo recibe lluvias intensas en intervalos de tiempo cortos la tierra se satura de agua y se torna incapaz de retener las nuevas precipitaciones. Se estima que la cantidad de tiempo necesaria para reestablecer una cubierta verde extensiva a su máxima capacidad de retención es de 6 días [Moran, 2004] o una semana [Berghage et al., 2007]. Debido a la imposibilidad de predecir las lluvias en forma

precisa, cualquier estimación de la cantidad de agua que el sistema puede retener sirve sólo como marco de referencia. La profundidad de la tierra del techo verde proporciona el espacio físico donde el agua será retenida, por lo cual éste es un buen parámetro que se puede usar para inferir la capacidad de retención.

3.1.2. Reducción del flujo máximo

Además de retener una porción del agua de lluvia en forma permanente, un techo verde puede reducir dramáticamente el flujo máximo de agua fuera del techo, y retrasar considerablemente el comienzo de este proceso. Esto se debe a que el agua debe atravesar una porción de la tierra presente para llegar al drenaje. De hecho, debe atravesar dicha tierra en forma vertical y luego en forma horizontal, proceso que puede o no verse asistido por la presencia de una pendiente. La demora entre el comienzo de la precipitación y el proceso de desagüe puede ser de varias horas, ya que primero se debe saturar toda la tierra con agua [Moran, 2004]. En un techo convencional con pendiente, prácticamente no existe retardo alguno entre el fenómeno de precipitación y el comienzo del drenaje del techo, ya que no existe material que frene el flujo de agua. Incluso cuando no existe pendiente, el retardo es insignificante.

En un estudio mencionado anteriormente en North Carolina, con un techo verde se registró una demora de 3 horas y media entre el comienzo de las precipitaciones y el momento en que empezó el proceso de desagüe [Moran, 2004]. En el estudio realizado por Penn State Green Roof Research Center, se registró una demora máxima de 2 horas y 20 minutos [Berghage et al., 2007]. El siguiente gráfico (Figura 3.1) muestra el registro del caudal acumulado desaguado de un edificio con un techo verde, y uno convencional en un evento de lluvia:

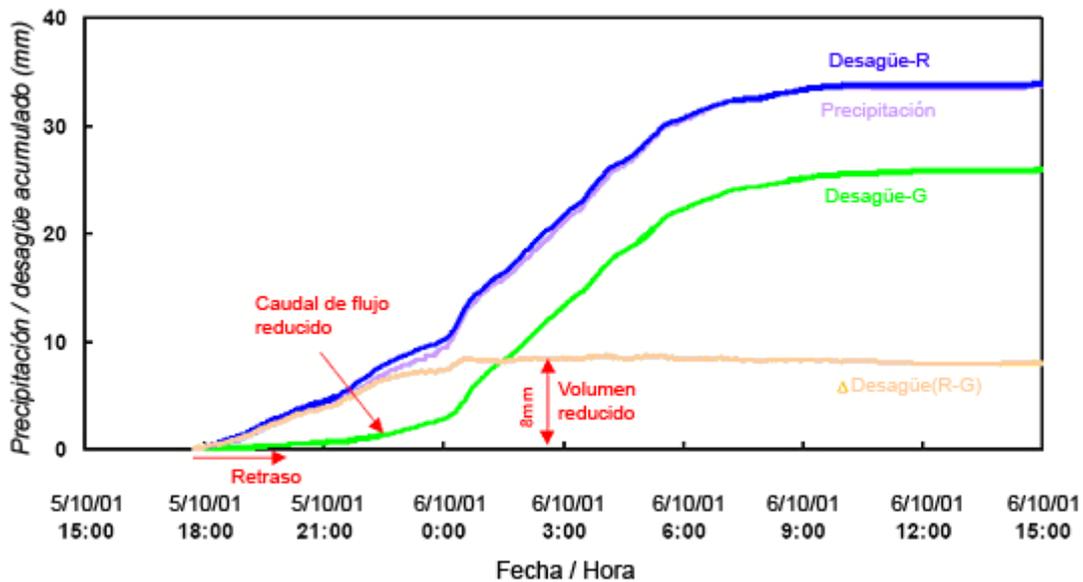


Figura 3.1.2-1: Desagüe acumulado para un evento de lluvia registrado entre el 5 y el 6 de Octubre del 2001. Fuente: Bass & Baskaran, 2003.

Como se puede apreciar, hubo una demora considerable entre el comienzo de la lluvia y el desagüe de esta agua desde el techo verde. Por lo contrario, y como es de esperar, no hay demora presente en el flujo de agua saliendo del techo convencional. Esta información indica que, de masificar el uso de esta tecnología, se produciría una reducción considerable en el caudal máximo de agua de lluvia recibido por el sistema de desagüe pluvial de una ciudad. En el caso de Buenos Aires, podría ayudar a salvar a la ciudad de un gran número de inundaciones que ocurren cada año en el centro urbano, o al menos disminuir sus efectos.

3.2. EFECTOS SOBRE EL CONSUMO ENERGÉTICO

Desde el punto de vista económico, los efectos sobre el consumo energético y sobre la vida de los materiales, son los beneficios más importantes de la aplicación de un techo verde. Más allá de los incentivos económicos que pueda ofrecer una municipalidad o gobierno que hagan atractiva y/o rentable la aplicación de esta tecnología, son estos beneficios los que pueden por sí solos hacer de esta idea algo practicable.

Los efectos de los techos verdes sobre la absorción de calor están muy bien documentados y los resultados de los estudios son sumamente positivos. En un estudio realizado en Japón [Onmura et al., 2001] se encontró que el flujo de calor hacia el interior del edificio fue reducido en un 50% al incorporar el techo verde. En otro estudio en Ottawa, la reducción fue del 75% anual [Liu & Baskaran, 2003]. Los estudios también encontraron que las temperaturas en un techo convencional superaban los 55°C, mientras que las temperaturas registradas en un techo verde se mantenían cercanas a los 21°C [Liu & Baskaran, 2003b; Bass & Baskaran, 2003]. Los estudios de Liu y Baskaran también muestran que las membranas impermeables de un techo convencional alcanzaban los 70°C, mientras que las membranas que se encuentran debajo de un techo verde promediaban los 25°C. Es interesante notar que en dicho estudio se encontró que, mientras que en los 22 meses de estudio la temperatura de ambiente había superado los 30°C tan solo un 10% de las veces, la temperatura de la membrana en el techo de referencia había superado esta temperatura en más de la mitad de los días registrados, comparado con un 3% para el techo verde [Liu & Baskaran, 2003]. En el Anexo IV se pueden encontrar una tabla con los datos del estudio. En Chicago, el 9 de Agosto del 2001, se tomaron mediciones de la temperatura del techo de la municipalidad usando un termómetro infrarrojo. Los resultados mostraron temperaturas de 52-54°C, 33-48°C y 76°C para áreas pavimentadas, el techo verde y una superficie de asfalto negro respectivamente [Laberge, 2003]. Debido a que el jardín cubre tan solo una porción del techo, se cree que una mayor cobertura hubiese reflejado una mayor diferencia. Para obtener los máximos beneficios del techo verde, es importante que tanto la tierra como la vegetación cubran la mayor superficie posible.

Las disminuciones en la temperatura del techo y en la cantidad de radiación solar absorbida por el techo tienen un efecto notable en las necesidades de acondicionamiento climático del edificio. En un estudio para el Departamento de Energía de USA realizado por el Oak Ridge National Laboratory, de Lockheed Martin, los resultados muestran una disminución del 25% en la demanda máxima de enfriamiento [Christian, J.E. y Petrie, T.W., 1996]. Otros estudios han encontrado que, debajo de un techo verde la temperatura ambiental era entre unos 3 y 4°C inferior a la temperatura ambiental externa para el rango de entre 25°C y 30°C [Liesecke et al., 1989]. Un estudio muestra que en los meses de primavera y verano la demanda media de energía para acondicionamiento climático es de 6-8kWh para el edificio con el techo de referencia y de 2kWh para el edificio con el techo verde, una reducción de más del 75% [Bass & Baskaran, 2003]. La siguiente figura, tomada de este estudio, muestra el flujo de calor a través del techo en un edificio con y sin un techo verde:

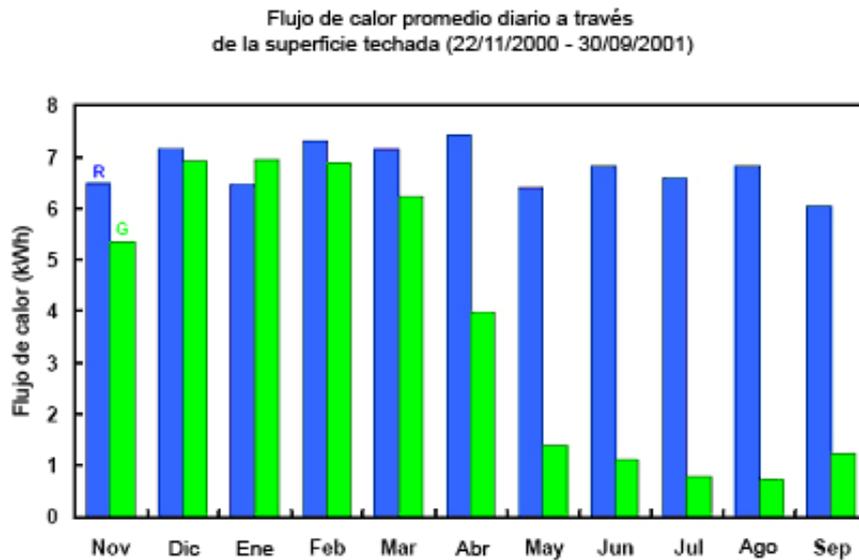


Figura 3.2-1: Requerimiento diario de energía promedio debido al flujo de calor a través de la superficie techada. Fuente: Bass & Baskaran, 2004.

En esta figura se puede ver cómo el techo verde, al reducir el flujo de calor hacia el interior del edificio, reduce la necesidad de acondicionamiento climático en los meses de verano. Un gráfico acumulativo sirve para ilustrar el potencial ahorro energético (Figura 3.3):

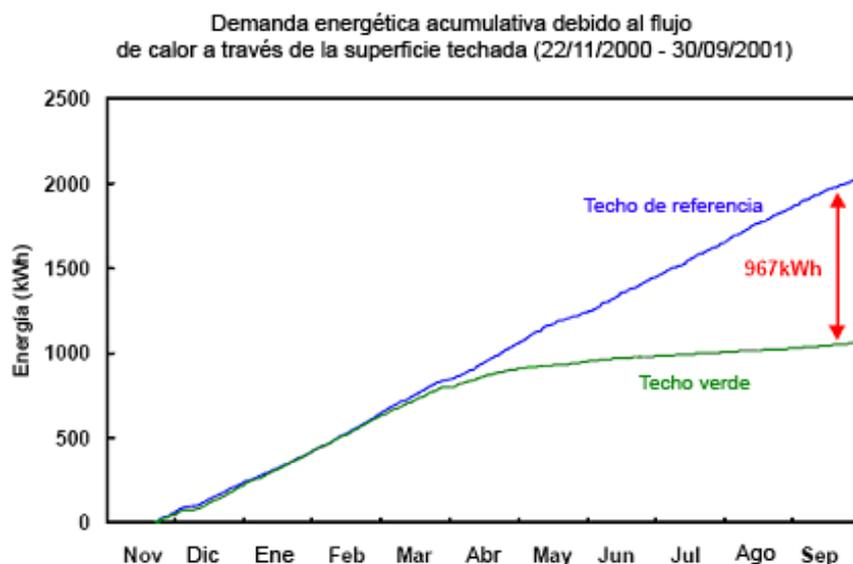


Figura 3.2-2: Requerimiento de energético acumulado debido al flujo de calor a través de la superficie techada. Fuente: Bass & Baskaran, 2004.

El ahorro de 967kWh es para una superficie de 36m² con una distancia al techo de 5m. Un diagrama del edificio utilizado y otra información adicional sobre el estudio puede encontrarse en el Anexo V. Bass y Baskaran muestran que, mientras que en un techo convencional se comienza a producir una transferencia de calor al interior momentos después de salir el sol, los techos verdes demostraron perder calor durante la mañana, y la transferencia de calor no se producía si no hasta después del mediodía [Bass & Baskaran, 2003; Liu & Bass, 2005]. La figura a continuación (Figura 3.4) muestra el flujo de calor durante a lo largo de un día de verano, donde se puede ver claramente este efecto:

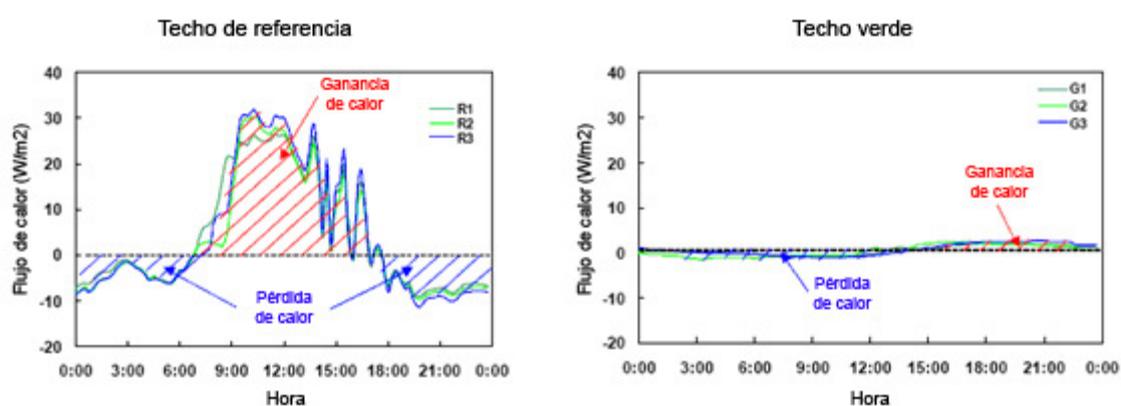


Figura 3.2-3: Flujo de calor a través de la superficie del techo en un día de verano. Fuente: Bass & Baskaran, 2004.

Adicionalmente, en otro estudio realizado por Liu y Minor se muestra que el flujo de energía hacia el interior de un edificio con un techo convencional, llegaba a un máximo de 15 W/m², mientras que el máximo para el techo verde era de 2,5W/m² [Liu & Minor, 2005].

Esta información apunta a un efecto combinado, en el cual todas las propiedades de un techo verde (ver la sección anterior) actúan para disminuir la diferencia de temperatura del techo, y retardar y reducir la transferencia de calor hacia el interior. Es importante notar que los edificios muy altos, en los cuales la superficie del techo es una fracción muy pequeña de la total, no se verían muy beneficiados, ya que la mayor parte de la transferencia de calor transcurriría en las paredes. Por lo contrario, los edificios bajos (entre 1 y 4 pisos) y de gran superficie son ideales para la aplicación de esta tecnología. Una simulación sobre la máxima necesidad de enfriamiento, obtuvo una reducción del 10% para todo edificio y de 25% y 9% para los dos pisos directamente abajo del techo verde [Saiz et al., 2006]. El mismo

estudio mostró una reducción en la necesidad de enfriamiento durante el verano de un 6% para todo el edificio de 8 pisos. Para una casa, en cambio, los valores fueron de 25% en total, y 60% para el piso directamente debajo del techo verde. Adicionalmente, hay que recordar que no solo se trata de un enfriamiento del ambiente interior, si no que el aire exterior en el techo también se encuentra a una temperatura menor. Los estudios realizados no parecen haber tomado en cuenta la influencia que podría tener este factor si los equipos de aire acondicionado se encontrasen en el techo.

Nuevamente, al tratarse de un sistema biológico y dependiente del clima es imposible predecir con certeza los efectos puntuales que se puedan conseguir en un caso o en otro. Sin embargo, los beneficios son lo suficientemente grandes como para que sigan teniendo un impacto importante, por más que alguna condición local los disminuya o afecte en alguna medida. Adicionalmente, la reducción en la necesidad de enfriamiento se verá afectada fuertemente por el diseño del edificio.

3.2.1. Estimación del ahorro energético

Basándose en la información de esta sección y en la disposición y consumo promedio del aire acondicionado en un edificio, se puede hacer un cálculo estimativo del ahorro energético que produciría la colocación de un techo verde en el mismo. Este cálculo está limitado al ahorro durante los meses de verano, y parte de los siguientes supuestos:

- Consumo energético de 1400kWh para 50m² en un hogar o 22m² de oficina (equipos tipo "split").
- Días de funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado: 90 días para un hogar, 64 días para una oficina.
- 8 horas de consumo cada día.
- Los costos son estimados para una superficie de 100m²

- La duración del techo verde es de 50 años

Estas premisas se basan en la información provista por arquitectos e ingenieros entrevistados durante el desarrollo de este trabajo. Para calcular el ahorro se toma como referencia los resultados de Liu & Baskaran, correspondientes a un ahorro del 75% en las necesidades energéticas del edificio. Para mayor consistencia, se determina ese valor como máximo, calculando también el ahorro en caso de que la reducción en el consumo sea de un 65% y un 55%. A su vez, se toman dos valores para el valor de la energía eléctrica, uno de 0,1 \$/kWh y otro de 0,2 \$/kWh. Los resultados encontrados se muestran en las tablas a continuación:

Tipo de Edificio	Consumo promedio (kW)	Consumo diario promedio (kWh)	Consumo diario ahorrado (kWh)		
			75%	65%	55%
Oficina	6,4	50,9	38,2	33,1	28,0
Hogar	2,8	22,4	16,8	14,6	12,3

Tabla 3.2.1-1: Cálculos del ahorro energético en el uso de aire acondicionado.

Costo de la energía (\$/kWh)	Reducción	Ahorro (anual)		Ahorro (50 años)	
		Oficina	Casa	Oficina	Casa
0,1	75%	\$ 244	\$ 151	\$ 12.218	\$ 7.560
	65%	\$ 212	\$ 131	\$ 10.589	\$ 6.552
	55%	\$ 179	\$ 111	\$ 8.960	\$ 5.544
0,2	75%	\$ 489	\$ 302	\$ 24.436	\$ 15.120
	65%	\$ 424	\$ 262	\$ 21.178	\$ 13.104
	55%	\$ 358	\$ 222	\$ 17.920	\$ 11.088

Tabla 3.2.1-2: Beneficio económico del ahorro energético.

Como se puede observar en la última tabla, existe un potencial de ahorro significativo durante la vida útil del techo verde. Sin embargo, la variación en los valores estimados se debe tomar como un reflejo del carácter estimativo de los mismos. Sin contar con información experimental localizada y, tomando en cuenta las variables reales que se deberían considerar, como por ejemplo, la ubicación, orientación y características estructurales del edificio, estos resultados sirven únicamente como un indicativo de la posible magnitud de los ahorros. También se debe tener en cuenta que un sistema de aire acondicionado central consume más

energía que equipos individuales, por lo que el ahorro energético podría ser mayor de lo calculado en esta sección.

3.3. EFECTOS SOBRE LA DEGRADACIÓN DE LOS MATERIALES

Los techos verdes ofrecen a las membranas impermeables una importante protección de los rayos ultravioletas. Al impactar los rayos X sobre la membrana, éstos producen cambios en el material que alteran sus características, tornándolo frágil y por lo tanto más sensible a la expansión térmica. La misma se puede igualar usando algún otro tipo de material que absorba la radiación antes de que ésta pueda llegar a la membrana, por ejemplo, usando grava, piedras o algún otro material granulado. Sin embargo, esta protección no resguarda al material de las fluctuaciones térmicas que día a día azotan la membrana creando y expandiendo fisuras que terminan produciendo filtraciones, efectivamente eliminando la funcionalidad de la membrana. Un techo convencional absorbe calor, incrementando su temperatura a lo largo del día, llegando a un pico durante o poco después del mediodía. Estas fluctuaciones térmicas afectan negativamente a la membrana impermeable, reduciendo su vida útil. Dependiendo del color de la membrana los cambios pueden ser más o menos drásticos. El techo verde ofrece una solución de un orden superior, impidiendo tanto la incidencia de los rayos ultravioletas como atenuando dramáticamente las fluctuaciones térmicas.

En los experimentos realizados por Bass y Baskaran, usando un sensor situado en la membrana, se encontró que la fluctuación térmica promedio en un techo de referencia era de 45°C mientras que en el techo verde era de 6°C [Bass & Baskaran 2003]. La temperatura máxima que alcanzó la membrana del techo de referencia fue de 70°C mientras que la membrana del techo verde jamás superó los 40°C. En las siguientes figuras se puede apreciar la fluctuación en la temperatura de la membrana impermeable del techo de referencia y en un techo verde. La figura 3.5 muestra la fluctuación diaria de la temperatura de la membrana en el techo de referencia, en el techo verde y la temperatura ambiental. La siguiente figura (3.6) muestra la fluctuación media para las dos membranas y para el ambiente según la estación del año.

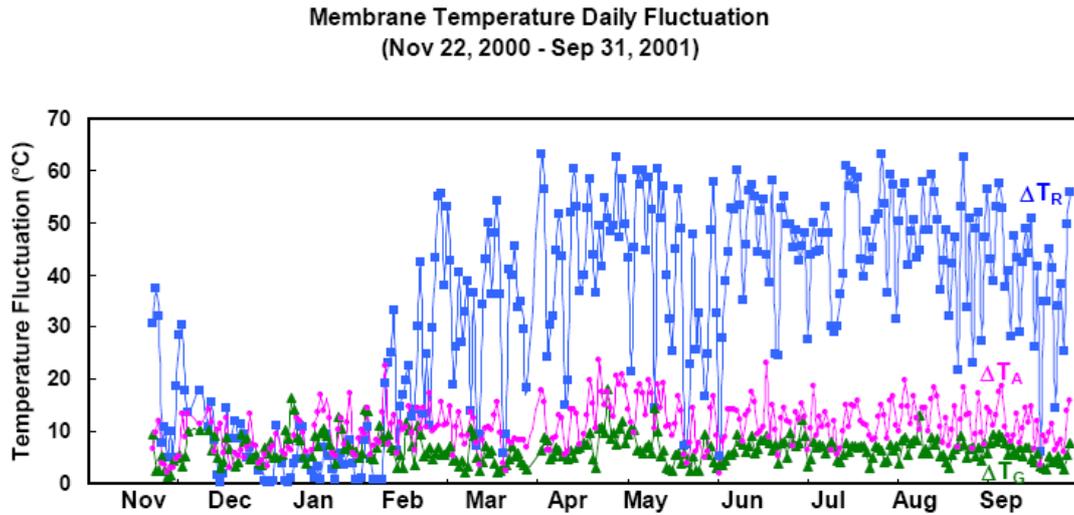


Figura 3.3-1: Fluctuación diaria de temperatura de la membrana impermeable.
Fuente: Bass & Baskaran, 2003.

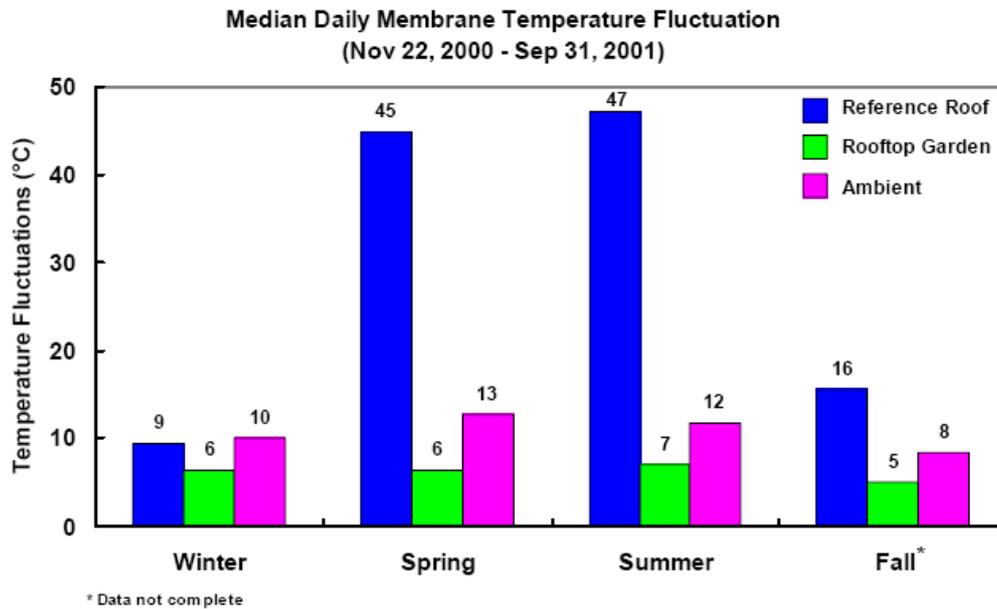


Figura 3.3-2: Fluctuación diaria media de la temperatura de la membrana por estación. Fuente: Bass & Baskaran, 2003.

El impacto de esta estabilización no es menor: según la Agencia de Protección Ambiental de EEUU podría extender la vida útil de la membrana en 20 años

[USEPA, 2000]. La duración de los techos verdes es difícil de pronosticar ya que la mayoría de los estudios realizados no abarcan el periodo de tiempo para realizar el seguimiento necesario, pero el valor comúnmente utilizado en los estudios sobre techos verdes es de 40-50 años y de 15-20 años para los techos convencionales.

4. DISEÑO

4.1. REQUISITOS

Los diseños analizados en este trabajo son aquellos que son aplicables cuando se cumplen con los requisitos fundamentales respecto de:

- La pendiente del techo
- La capacidad portante de la estructura.

Para que el agua puede ser drenada correctamente de un techo verde es necesario que el mismo tenga una pendiente mínima (no es recomendable un techo enteramente plano), pero tampoco es posible que la pendiente sea demasiado pronunciada. La literatura existente sobre el tema recomienda que la pendiente no supere el 10% ya que de lo contrario el sustrato de crecimiento se caerá lentamente del techo, arrastrando a las plantas consigo. Es enteramente factible construir un techo verde en un techo con una pendiente pronunciada pero esto requiere la instalación de vigas de madera u otro material sobre el techo en ciertos intervalos para impedir el deslizamiento de la tierra. Otra solución es la construcción de terrazas o balcones sucesivos, similares a los utilizados por agricultores en las montañas para conseguir la mayor cantidad de terreno nivelado a partir de una pendiente. Estos casos no son parte de este estudio y por lo tanto no serán considerados para las recomendaciones de diseño.

El otro requerimiento fundamental es la capacidad del techo de sostener la estructura. Los techos verdes extensivos son diseñados para ser livianos y presentar la menor carga estructural posible. En este trabajo se seguirá esta premisa, pero no serán mencionadas las técnicas para reforzar una estructura para soportar el peso adicional. Se omite este aspecto debido a dos motivos: En primer lugar, se estima que la mejor solución para reforzar un techo dado es independiente para cada caso y por lo tanto no concuerda con el objetivo de este proyecto. En segundo lugar, se considera que, de ser necesario reforzar un techo para poder instalar un techo verde, los costos implicados no harían recomendable dicha instalación desde un punto de vista económico.

4.2. ESTRUCTURA BÁSICA

Un techo verde consiste básicamente en una serie de capas de materiales de distintos materiales que sirven para proteger la estructura del techo y para mantener a las plantas vivas. En un techo convencional sin tejas, se tiene en primer lugar la construcción del techo propiamente dicho. Es decir, los materiales que crean la estructura y la mantienen en pie. Es necesario proteger esta estructura del agua por lo que se usa una membrana de material impermeable para crear un aislamiento hidrófugo. La capa de material impermeable puede ser aplicada de varias maneras, por ejemplo pintando el techo con algún tipo de resina o alfombrando con una membrana. Adicionalmente, se puede ubicar un aislante térmico por debajo o por arriba de la membrana impermeable para mayor protección térmica. En caso de ubicarse por arriba, se debe colocar otra capa adicional de material impermeable. Los efectos de los techos verdes, tengan o no aislamiento térmico parecen ser muy similares, y no existe actualmente un estudio que compare directamente esta diferencia. A partir de esta membrana se erige el techo verde, que consiste primero en una barrera de protección para impedir el crecimiento de las raíces, que pueden llegar a dañar la membrana impermeable. Para esta capa se usa generalmente algún material que contenga sulfato de cobre o con algún otro agente antiraíces. Arriba de esta capa se ubica la capa de drenaje, cuya función es facilitar el flujo de agua hacia los conductos para lluvia. Generalmente se usa alguna membrana que tenga agujeros y canales por los cuales el agua pueda escurrirse. En la mayoría de los casos se trata de membranas de unos centímetros de espesor, pero algunos fabricantes hacen membranas con formas similares a las de una chapa corrugada o con pequeñas hendiduras en formas de copa que ayudan a retener agua para que pueda ser utilizada por las plantas.

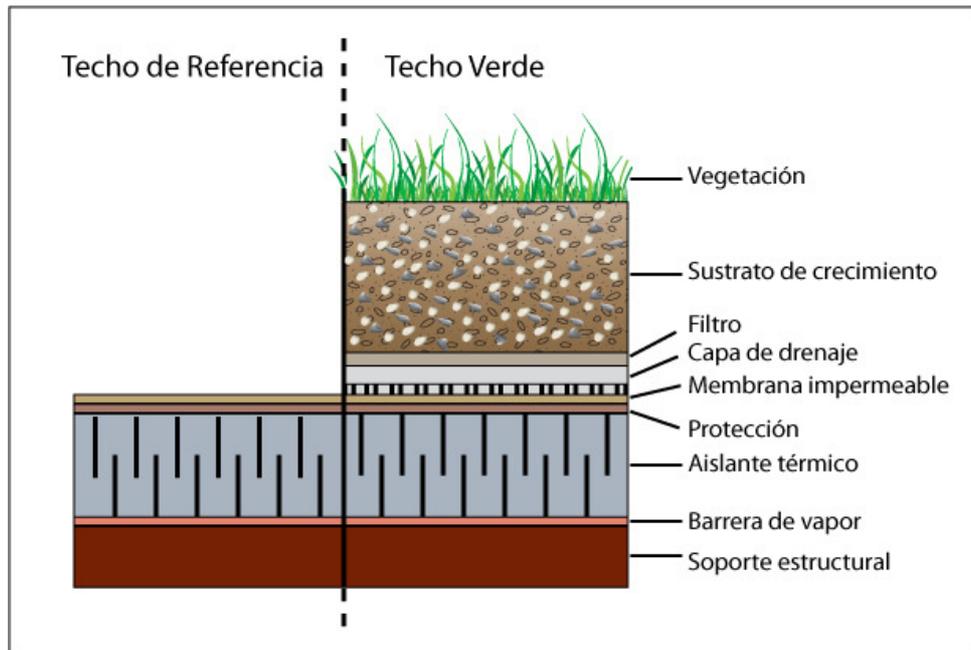


Figura 4.2-1: Esquema de los componentes de un techo verde.

Por encima de la capa de drenaje se ubica un filtro cuya función es impedir que partículas finas lleguen a la capa de drenaje ya que esto puede provocar obstrucciones. Arriba del mismo se encuentra el sustrato de crecimiento, que consiste en tierra mezclada con fibras, piedras o material poroso. El mismo está diseñado de forma tal de proveer los minerales y nutrientes necesarios minimizando el peso del terreno. Por encima de este sustrato se encuentra la capa de vegetación que está compuesta por plantas resistentes a sequías, que deben ser seleccionadas según las condiciones predominantes del techo por un experto. Dentro del género de los techos verdes extensivos existen dos formas principales: el Modular y el Tradicional o Integral.

	Tradicional	Modular
Instalación		
Tiempo	<ul style="list-style-type: none"> - El trabajo de colocación de las membranas puede demorar varios días. - Se debe prestar cuidado especial para asegurar el crecimiento de las plantas en los primeros meses. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rápida instalación. - Las plantas se instalan ya crecidas.
Facilidad	<ul style="list-style-type: none"> - Tarea simple: difiere levemente de la instalación de un techo y un jardín. - Es necesario seguir las guías de instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sumamente sencilla. - Consiste en ubicar bandejas en su lugar.
Costo	<ul style="list-style-type: none"> - Menor costo debido a la posibilidad de seleccionar distintos proveedores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor costo al agregar un elemento más al sistema. - Se realiza un trabajo más minucioso antes de la instalación.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe hacer por partes. - Debe ser posible retirar parte del jardín para realizar el mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sencillo y práctico. - Las bandejas se pueden retirar para realizar cualquier tarea.
Diversidad	<ul style="list-style-type: none"> - No se permiten grandes variaciones en el espesor del terreno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cada bandeja puede tener un espesor distinto y una variedad distinta de plantas.
Disponibilidad	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede implementar acualmente consiguiendo los materiales necesarios. 	<ul style="list-style-type: none"> - No existe ninguna empresa local dedicada a la producción de los módulos. - Es necesario crear los módulos a partir de productos existentes.

Tabla 4.2-1: Diferencias entre el sistema tradicional y modular.

El sistema **tradicional** involucra la aplicación de las membranas mencionadas en la totalidad del techo del edificio en forma continua, con la excepción de los bordes del techo, los espacios transitables y los bordes de protuberancias como chimeneas o canales de desagüe. Este sistema es el más utilizado históricamente, pero esta siendo gradualmente reemplazado por el sistema modular a medida que surgen más empresas dedicadas a la instalación de techos verdes.



Figura 4.2-2: Instalación de un techo verde modular. (Fuente: GreenGrid™)

El sistema **modular** ofrece una mayor facilidad de instalación y de reparación. Es posible utilizar el sistema para usar distintas plantas con distintas profundidades de terreno en forma sencilla, pudiendo crecer las plantas en un vivero para colocarlas luego en el techo. La desventaja de este sistema es el mayor costo inicial y el hecho de que actualmente ninguna empresa de la región realiza este tipo de producto. El sistema es bastante sencillo y muy similar al sistema tradicional. Básicamente se trata de cortes del sistema tradicional desde arriba hasta antes de la capa de drenaje puestos en cajas cuya forma conforma el sistema de drenaje. Las bandejas de plástico que conforman los módulos son generalmente diseñadas específicamente para este propósito. Esto hace que sea difícil desarrollar este sistema a partir de productos existentes. En el Anexo VI se encuentra información sobre sistemas modulares producidos por la empresa GreenTech™.

4.2.1. Consideraciones generales

Es importante prestar atención a los lugares donde el jardín se encuentra con un obstáculo o con alguna discontinuidad en el techo, como por ejemplo, cañerías y equipos de aire acondicionado. Lo mismo es cierto para los bordes del techo. No es recomendable que haya un contacto directo entre el jardín y estos elementos. La práctica recomendada es la de crear una separación de 50cm usando tejas, losas, grava o un recubrimiento transitable. No es conveniente dejar la membrana impermeable expuesta para lograr esto, ya que se produciría un desgaste desigual

de la misma a lo largo del techo. La siguiente figura muestra como debe ser la separación con los límites del techo y con un sumidero:

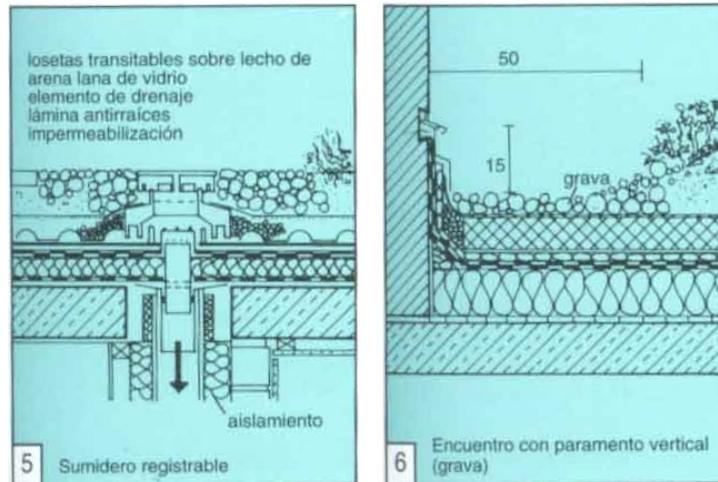


Figura 4.2.1-1: Detalle de la conformación de las separaciones del jardín con elementos del techo. Fuente: Neufert & Neff, 1999.

4.3. MEMBRANAS IMPERMEABLES

Debido a la degradación de la membrana impermeable que ocurre en un techo convencional, resulta óptimo realizar la instalación de un techo verde simultáneamente con la instalación de una nueva membrana impermeable. De esta manera se obtendrá el mayor rendimiento y se prolongará la vida útil de la membrana. Por lo contrario, si la membrana ya se encuentra desgastada, es posible que sea necesario un cambio poco después de instalar el techo verde, lo cual resultaría en un trabajo innecesario. Además, resulta conveniente llevar a cabo la colocación de todos los componentes en una sola etapa.

Las membranas impermeables más apropiadas para utilizar en un techo verde son las de PVC reforzado, de goma sintética EPDM, o asfálticas con base de geotextil o con materiales poliméricos, ya que estas ofrecen una mayor resistencia a las raíces y por lo tanto resulta innecesario incorporar una membrana adicional que impida el crecimiento de las mismas. También es posible usar pinturas impermeabilizantes que pueden ser más fáciles de aplicar que las membranas. Por lo contrario, sí es necesario contar con dicha protección si la membrana impermeable es bituminosa o

contiene material orgánico. Las impermeabilizaciones asfálticas más tradicionales no resultan convenientes debido a estos mismos motivos y deberían ser evitadas [BES, 2004; CSI, 2007; BES, 2004; City of Indianapolis, 2008].

En el mercado local existen varios proveedores de estos productos, ofreciendo una variedad de precios y servicios como la colocación del producto. Es importante notar que el proveedor generalmente no ofrecerá garantía sobre el producto, a menos que sea colocado por gente de la empresa. Algunos productos que se venden en el mercado local, como la línea Sernafil de la empresa Sika, son recomendados para su uso en techos verdes debido a su alta calidad. Sin embargo, es posible realizar la impermeabilización con materiales más económicos sin comprometer el funcionamiento del sistema.

4.4. CAPA DE DRENAJE

La capa de drenaje asegura el flujo del agua de lluvia por el jardín hacia los desagües del edificio, permitiendo desaguar el techo en forma efectiva. Es necesario asegurar un correcto drenaje de la superficie del techo para que el mismo no sea sometido a cargas estructurales excesivas debido a la acumulación de agua en el mismo y para que las plantas puedan mantenerse con vida. Las gamas de opciones de materiales que pueden ser usados para crear la capa de drenajes son amplias, por lo que resulta conveniente clasificarlas en categorías.

Granular

- Grava
- Lava y pómez
- Cerámica expandida y pizarra quebradas
- Cerámica expandida y pizarra sin quebrar
- Ladrillo quebrado

Membranas drenantes

- Membrana texturada no tejida
- Membrana plástica tachonada
- Membrana de fibra tejida

Planchas drenantes

- Planchas hechas de pelotas de espuma plástica
- Planchas tachonadas de goma o plástico
- Planchas rígidas de plástico
- Planchas de espuma plástica

En el primer caso se usa cerámica rota, piedras, madera o algún otro tipo de material en forma granular que permita el flujo del agua a los drenajes, pero que sea lo suficientemente resistente como para que su fisonomía permanezca inalterada a lo largo del tiempo, proveyendo el soporte estructural necesario a las capas que la preceden. Se puede usar grava combinada con tubos perforados colocados en forma estratégica para lograr un mejor drenaje si es necesario. Si el techo tiene una pendiente suficiente y una buena cantidad de rejillas con drenaje para el agua de lluvia, no hace falta siquiera colocar los tubos. A pesar de su efectividad, este tipo de drenaje no es recomendado ya que por lo general implica mayor peso por metro cuadrado y mayor volumen que cuando se usa una membrana prefabricada. Pueden resultar convenientes en techos donde se necesita cubrir una superficie no uniforme, donde la presencia de relieves o detalles varios pueda comprometer el funcionamiento del drenaje, pero no son frecuentemente utilizados y rara vez son mencionados en la literatura existente. En vista de esto, se recomienda solamente el uso de planchas impermeables tachonadas, de materiales granulados o de membranas permeables.

Existe una variedad de membranas tachonadas especializadas para ser usadas en el drenaje de jardines o de áreas deportivas cuya aplicación es recomendada en un techo verde. Generalmente consisten en planchas de polietileno con hendiduras cónicas que se usan para separar la membrana filtrante que es colocada arriba. De esta manera, se producen canales de la altura de los conos a lo largo de toda la superficie. Estos canales permiten el flujo del agua en forma uniforme y segura. Algunos de estos productos son diseñados en forma tal que los conos apunten hacia abajo, con los agujeros que permiten el drenaje en la parte superior (plana) de la membrana. Este diseño en particular sirve para retener agua de forma que pueda luego ser utilizada por las plantas, y son muy efectivos.

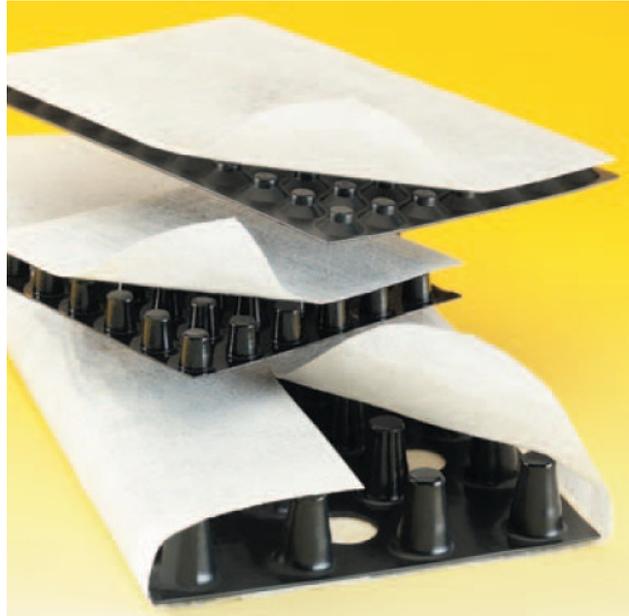


Figura 4.4-1: Placas drenantes de la línea Plusdren. (Fuente: Coripa S.A.)

En el país, la empresa Coripa comercializa una línea de productos, PlusDren, que podrían utilizarse efectivamente en techos verdes. Es posible que se tengan que realizar algunas adaptaciones al producto, por ejemplo, la perforación de agujeros, ya que algunos de los productos no los tienen. Otra opción es la importación de productos extranjeros, que son mucho más especializados y sobre los cuales se han realizado varios estudios. Las empresas American Hydrotech y Oldroyd ofrecen una amplia gama de productos diseñados específicamente para estos sistemas. En el Anexo VII se presenta información técnica sobre estos productos.

Si se desea usar material granulado como cerámica, se recomienda realizar mantenimiento periódico de los desagües y controlar frecuentemente la composición de la tierra, especialmente después de eventos de lluvia, ya que, como se mencionó anteriormente, es probable que se tenga una mayor pérdida de material del sustrato de crecimiento. Por estas razones, esta opción no es aconsejable para regiones lluviosas.

A pesar de que el uso de una capa de drenaje es recomendado, existe la posibilidad de desechar este elemento si la pendiente es suficiente para garantizar un drenaje adecuado. En caso de no contar con una pendiente suficiente, el uso de placas de drenaje plásticas puede tener un efecto negativo sobre el sistema. En estos casos es posible colocar una carpeta de hormigón pobre sobre el techo para crear la

pendiente necesaria. Esta misma técnica puede ser usada para aumentar la pendiente a un punto en el que no sea necesario el uso de una capa de drenaje. Es posible que esta opción sea más económica que el costo de dicha capa.

4.5. MEMBRANA FILTRANTE

De todos los componentes de un techo verde existen dos que son de particular interés. El primero es la membrana impermeable, la cual debe funcionar sin problemas para mantener a la estructura segura y libre de daños. La otra es la membrana filtrante, que debe asegurar la contención del sustrato de crecimiento e impedir la obstrucción de los canales de drenado. Si los poros en la membrana son demasiado grandes, se puede perder rápidamente gran parte del sustrato de crecimiento, lo cual resultaría en la necesidad de agregar material frecuentemente, aumentando los costos de mantenimiento y reduciendo la vida útil del sistema. Por lo contrario, si los poros son demasiado chicos se pueden tapar fácilmente, impidiendo el drenado correcto del agua, que podría resultar en la inundación del sustrato de crecimiento con los consecuentes riesgos a la estructura del edificio y la probable muerte de la vegetación. En la guía para la construcción de techos verdes de la FLL se listan algunos requerimientos a cumplir. Específicamente, recomienda el uso de geotextiles no tejidos como membrana filtrante. En la siguiente tabla se listan los puntos principales.

Descripción	Requerimiento
Densidad	De entre 100 y 200 g/m ² para techos verdes de hasta 25cm de profundidad. Para medios mas profundos la densidad puede ser mayor.
Resistencia al punzonamiento	Las fabricas no tejidas deben ser de Clase 1, con una resistencia al punzonamiento $\geq 0,5$ kN, provisto de que no haya esfuerzos mecánicos elevados durante la construcción o el tránsito
Apertura de filtración	O90,w < 0,2mm
Penetración de raíces	Debe permitir la penetración de las raíces
Resistencia a quimicos y micro-organismos	Debe resistir los efectos de los quimicos presentes en la tierra y de micro-organismos
Resistencia a la tracción, flexibilidad y coeficiente de	Son dependientes del sitio donde sera instalado.

Tabla 4.5-1: Características requeridas de las membranas geotextiles. (Fuente: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau)

Se recomienda leer extensivamente la guía publicada por la FLL. La misma se encuentra disponible en alemán y en inglés y puede ser comprada en la página del instituto, la cual puede ser encontrada en la bibliografía.

En el país existe una amplia gama de geotextiles disponibles que resultan aptos para el uso en techos verdes.

4.6. MEMBRANA DE PROTECCIÓN

De ser necesario se puede usar una capa protectora para incrementar la vida de la membrana impermeable o las capas aislantes (si están presentes). Se trata de un seguro o un refuerzo adicional que no es completamente necesario, pero es a veces implementado. La utilidad de este nivel adicional de protección es incierta y es posible que no sea necesario en la mayoría de los casos. Como suele ser el caso respecto de esta tecnología, no existe estándar al respecto de cuándo es necesaria su implementación. Sin embargo, algunas fuentes recomiendan el uso de membranas geotextiles como membranas protectoras, por lo que se recomienda usar la misma utilizada como membrana filtrante.

4.7. SUSTRATO DE CRECIMIENTO

El sustrato de crecimiento debe ser liviano para no someter el techo a un peso excesivo, pero también debe contener los minerales y nutrientes necesarios para poder mantener a las plantas con vida. En general, la composición exacta de la tierra dependerá de las plantas que serán plantadas, pero existen algunos lineamientos básicos para producir un sustrato apto para un techo verde. La publicación “Lineamientos para el Planeamiento, Ejecución y Mantenimiento de Techos Verdes” de la FLL constituye una excelente fuente de información sobre este tema y contiene lineamientos y estándares apropiados para cualquier techo verde. Si bien la guía es muy detallada, existen algunos requerimientos básicos que el terreno debe cumplir. Los mismos se encuentran listados en la tabla a continuación:

Propiedades Físicas	Valor	Unidades
Retención de Agua	≥ 25%	% del volumen
Máxima capacidad de retención de agua	≥ 35	% del volumen
Contenido de aire cuando la máxima capacidad de agua esta siendo retenida	≥ 10	% del volumen
Permeabilidad (comprimida)	≥ 60	mm/min
Contenido de aire (saturado)	≥ 25%	% del volumen
Densidad (saturado)	0,8 - 1,4	g/cm ³
Propiedades Químicas	Valor	Unidades
pH	6,5-8	
Contenido de sal del agua extraida	1	gr/l
Materia orgánica Inicial	3-8%	% de la masa
Nitrogeno	≤ 80	mg/l
Fósforo	≤ 200	mg/l
Potassio	≥ 700	mg/l
Magnesio	≤ 160	mg/l

Tabla 4.7-1: Características requeridas del sustrato de crecimiento. (Fuente: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau)

En el mismo documento se detallan métodos experimentales para conducir pruebas sobre el terreno y sobre la vegetación, que pueden ser de gran utilidad para investigar cómo el terreno se desempeñará antes de ser instalado un proyecto. Estos estudios se pueden usar para prevenir problemas posteriores a la instalación que costarían tiempo y dinero reparar. Es posible que se necesiten efectuar algunos ajustes a los valores mencionados debido a aspectos regionales, como pueden ser factores climáticos o las plantas que serán utilizadas. Es por esto que resulta aconsejable consultar con un paisajista u otro profesional competente al definir la composición del sustrato de crecimiento, especialmente si se abarcará una gran superficie. En el marco de la oferta en el mercado local, existe una variedad de marcas que ofrecen productos que se pueden utilizar en techos verdes. Entre ellos se recomienda el uso de Tierra Negra Preparada Bertinat o productos similares. Esta tierra es de muy bajo peso y ofrece un medio apto para el crecimiento de las plantas en sustratos delgados. A su vez, contiene un 20% de perlita, el cual es el valor recomendado para este tipo de aplicaciones.

4.8. ELECCIÓN DE PLANTAS

Si bien existe documentación extensiva y estudios que analizan el uso de diversas plantas en los techos verdes, estos sirven de poca ayuda al extrapolar el problema de la selección de plantas a la provincia de Buenos Aires. El problema principal, es

que la vasta mayoría de los techos verdes se ubica en el hemisferio norte, en continentes distintos y en regiones con climas distintos al que se tiene en Buenos Aires. En estos proyectos, generalmente se usan plantas nativas de la región por cuestiones climáticas y de disponibilidad. Esto significa que al intentar elegir plantas para usar en proyectos locales, actualmente, solo se puede recurrir a aproximaciones, a plantas que sean similares a las usadas en otros países, pero que sean capaces de sobrevivir bajo las condiciones locales. Estas elecciones se basan en las recomendaciones de expertos y no en ensayos experimentales, y consisten en plantas que se encuentran naturalmente experimentando condiciones similares a las que experimentarían estando en el techo de un edificio bajo. A continuación se listan las plantas recomendadas para los proyectos en Buenos Aires. En el Anexo VIII se puede encontrar una lista de plantas que son frecuentemente utilizadas para la construcción de techos verdes.

4.8.1. Mesembryanthemum Edule (uña de gato)

Esta planta es utilizada en Mar del Plata y en otros lugares para fijar médanos en las playas y es una de las más recomendadas para este tipo de aplicación, ya que no requiere de mucho enraizamiento y soporta muy bien la falta de agua. Las plantas se deben plantar a una distancia de 30cm de cada una, que se traduce a aproximadamente 9 gajos por m².



Figura 4.8.1-1: Mesembryanthemum Edule

4.8.2. Sedum Acre

Esta variedad requiere más agua que la anterior, por lo que es posible que requiera de riego en caso de que no se produzcan lluvias durante mucho tiempo. Se planta con una distancia de 20cm entre las plantas y se comercializa en macetas de 12cm. El género Sedum es uno de los más usados mundialmente para la construcción de techos verdes, ya que no solo cumplen con los requisitos necesarios, si no que además se puede recurrir a variedades locales que se han adaptado al clima regional.



Figura 4.8.2-1: Sedum Acre

4.8.3. Carex Broncina y Stipa Tenuissima

Estas plantas de deben plantar en conjunto, con una separación de 40cm, pero requieren de un sustrato de unos 20cm de profundidad para crecer correctamente. Es aconsejable combinar el uso de estas plantas con alguna malla que sea capaz de proveer mayor soporte a las mismas en caso de que se produzcan vientos fuertes.



Figura 4.8.3-1: Carex Broncina (izquierda) – Stipa Tenuissima (derecha)

4.8.4. Césped

Una solución práctica desde el punto de vista del conocimiento y de los recursos disponibles localmente, es el simple uso del césped para cubrir uniformemente el techo. Existe tanto la posibilidad de sembrar el mismo, como de usar panes de pasto que simplificarían drásticamente el proceso de instalación del sistema. Esta opción de planta es la que más simplicidad ofrece, teniendo en cuenta la calificación de la mano de obra disponible en la región y resulta muy atractiva visualmente, por lo que podría usarse en un proyecto que cuente con mucha exposición pública. El principal aspecto negativo del uso de césped, es la necesidad de riego diario y de podado, que aumenta el costo total, tanto de la instalación como del mantenimiento. De hecho, al tener que regar el césped, es posible que se eliminen del sistema los beneficios asociados con la capacidad de retención del agua de lluvia en el sustrato de crecimiento, los cuales dependen intrínsecamente de la humedad presente en el mismo. Para mantener el techo cubierto en forma efectiva durante todo el año se recomienda el uso de dos variedades de césped, Perenne (de invierno) y Bermuda (de verano). En caso de plantar estas variedades, se debe usar 7 kilos por cada 100m² de la primera y 1 kilo por cada 100m² de la segunda.



Figura 4.8.3-1: Césped Perenne.

Cualquiera sea la elección, no es recomendable ubicar un techo verde en un edificio de altura sin antes realizar estudios con diversas plantas. De hecho, en esta etapa, mientras los techos verdes en Buenos Aires permanezcan en etapa de desarrollo, lo mejor sería ubicar distintas especies de plantas en un mismo techo y ver como se desarrollan, para poder así determinar cuales son las más aptas. Sin embargo, esto no significa que no puedan desarrollarse proyectos sin tener información experimental. Plantas como la Uña de Gato, o un césped bien cuidado, resultan más que aptos para sobrevivir en las condiciones de un techo. En un techo elevado, las condiciones son más extremas, y por lo tanto es más importante hacer una correcta selección de las plantas y realizar mantenimiento adecuado, pero en un techo bajo, las condiciones pueden no diferir demasiado de las que se encuentran al nivel del suelo.

4.9. SISTEMA MODULAR

Como fue mencionado anteriormente, el sistema modular ofrece un numero de ventajas por sobre el sistema tradicional, pero no existe ninguna empresa en la región que comercialice techos verdes modulares. Debido a esto, resulta algo difícil intentar crear un sistema modular efectivo sin llevar a cabo pruebas de algún tipo, destinadas a probar el funcionamiento del sistema antes de su instalación. Uno de los aspectos más cruciales del sistema, es el correcto drenaje de agua por debajo y por los costados de las bandejas o módulos. Los orificios en la parte de abajo de la bandeja deben ser suficientemente grandes para que el agua pueda escapar

fácilmente, pero también es necesario que la parte inferior del módulo tenga algún tipo de irregularidad, con secciones algo levantadas del piso. De esta forma, el agua puede fluir entre los módulos, ya que de lo contrario, si los mismos están en firme contacto con el piso a lo largo de toda su superficie, el agua drenada quedaría estancada debajo de cada módulo, pudiendo resultar esto en la inundación de los mismos o en su desplazamiento debido a la acumulación del agua y su incapacidad de fluir libremente por debajo de los módulos.

Exceptuando estas necesidades, el sistema es muy similar a uno tradicional. En la caja o módulo se ubica un filtro en la parte inferior, si es posible con algún material antiraíces, y luego viene el sustrato de crecimiento y las plantas. En este caso, la membrana impermeable del techo no está en contacto directo con los otros componentes del techo verde (salvo la superficie del módulo), por lo que no es necesario cambiarla, a menos que se encuentre en muy mal estado. Como fue mencionado, la parte inferior de la caja que conforma el módulo actúa como capa de drenaje. Ya que los módulos se pueden trasladar fácilmente, las tareas de mantenimiento resultan mucho más sencillas y menos trabajosas, ya que es posible mover los mismos para inspeccionar el estado de las membranas impermeables y realizar otras tareas. Las ventajas de este sistema son evidentes especialmente cuando se intenta incorporar un techo verde a una estructura existente. Todas las etapas, desde el diseño hasta la instalación y el mantenimiento, se ven beneficiadas por este sistema, siendo la principal contra el mayor costo, el cual podría incluso ser mitigado parcialmente por la ausencia del costo de la capa de drenaje y la menor cantidad de personal requerido para llevar a cabo la instalación.

Si bien no existen productos locales diseñados específicamente con este uso en mente, se pueden adaptar otros para cubrir los requerimientos de un techo verde modular. Las cajas plásticas ranuradas usadas para transportar frutas y vegetales ofrecen una alternativa atractiva para crear un sistema modular en la región, sin recurrir a productos especializados que deben ser importados o hechos a la medida.

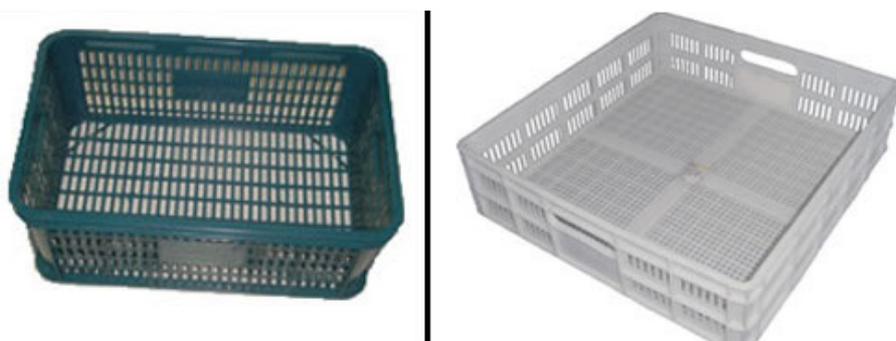


Figura 4.9-1: Cajas plásticas ranuradas para fruta y vegetales.

Estas cajas generalmente tienen el piso y los costados ranurados, siendo el ideal uno en el que el piso no solo sea ranurado, si no que también tenga relieve, y que los costados sean sólidos. Ambos problemas se pueden solucionar fácilmente incorporando tacos que eleven el cajón, y usando un film plástico para tapar las ranuras laterales. Teniendo esto en cuenta, hay un gran número de empresas locales que pueden proveer este tipo de productos, por lo que sería conveniente realizar ensayos preliminares sobre diseños adaptados en forma sencilla y rápida.

5. COSTOS

El costo de instalación de un techo verde puede variar considerablemente de un caso a otro, dependiendo de las características estructurales del edificio, la superficie proyectada y detalles, como por ejemplo el tipo de membrana impermeable presente en el momento que se lleva a cabo el proyecto. Se deben tener en cuenta también factores como la pendiente del techo, ya que con una pendiente suficiente (aprox. 10°) se puede obviar el uso de la membrana drenante, sustituyéndola por membranas de nylon o eliminando el concepto de la capa drenante por completo. En el caso de pendientes muy pronunciadas es necesario recurrir a la instalación de separadores que dividan al techo en secciones para evitar que el peso de la tierra y el agua hagan que el jardín se deslice fuera del techo. Uno de los mayores problemas que se pueden llegar a tener, es la necesidad de reforzar la estructura del techo para que éste sea capaz de soportar el peso del jardín. Es sumamente difícil que esto ocurra al querer instalar un techo verde extensivo, si se siguen los lineamientos descritos en éste y en otros trabajos, pero puede ocurrir.

Debido a estas particularidades, el análisis de los costos de instalación estará basado en los techos de losa con poca pendiente que se encuentran frecuentemente en Buenos Aires. El costo será calculado para una superficie de 100m² para facilitar su adaptación y uso para estimar los costos de proyectos futuros.

5.1. COSTO DE LAS PLANTAS

Lo primero a considerar son las plantas que serán utilizadas para el proyecto, ya que esto dará la pauta para otros costos. En la sección anterior se encuentran listadas cuatro alternativas, cuya elección fue basada en la literatura disponible, en los recursos disponibles localmente y en las características climáticas de la región. El costo de cada una de las plantas se basa en la información disponible en el momento de redacción de este documento y es por lo tanto, susceptible a cambios.

5.1.1. Uña de Gato (*Mesembryanthemum Edule*)

La *Mesembryanthemum Edule* o “Uña de Gato” es una de las opciones más atractivas para la construcción de un techo verde en Buenos Aires. Sin embargo, no se comercializa en viveros, ya que se puede extraer manualmente de diversos lugares, lo cual hace que no sea un producto rentable. Para conseguir esta planta, es necesario ir a Mar del Plata u a otro lugar donde se encuentre, y extraerla manualmente simplemente cortando secciones de la planta que luego se plantan en la tierra. Esto puede ser algo complicado para proyectos sumamente grandes, pero lo bueno es que es posible abaratar el costo material del mismo si se hace la recolección en un mismo viaje. Adicionalmente, al no involucrar intermediarios, el costo se reduce únicamente al costo de recolección y transporte, lo cual la hace sumamente económica. Con una recomendación de 9 plantas por m², se necesitarían 900 plantas por cada 100m². En este caso es difícil presupuestar el costo debido a su naturaleza, pero resulta factible asumir un costo de \$1400 para cubrir la recolección y el transporte de este número de plantas. Estas plantas requieren de unos 15cm de profundidad de tierra para poder crecer correctamente.

5.1.2. *Sedum Acre*

La *Sedum Acre* presenta un problema un tanto irremediable a la hora de proyectar un techo verde. Se trata de una planta que no se consigue en grandes cantidades en viveros, lo cual hace que sea impracticable su uso en proyectos de gran superficie. De hecho, sus números son tan escasos que puede resultar difícil conseguir más que un par de ejemplares, a un costo aproximado de \$15 cada una. Plantándolas a la distancia recomendada (20cm) el costo para cubrir 100m² es de \$37500. Su uso es recomendable para techos muy pequeños, sólo en la medida que sea factible conseguir ejemplares suficientes. A su vez, requieren más agua que la Uña de Gato para poder vivir, por lo que es posible que requieran de riego ocasional y de un sustrato de crecimiento con más de 15cm de profundidad.

5.1.3. *Carex Broncina* y *Stipa Tenuissima*

Si bien ambos ejemplares se comercializan en mayor número que la especie anterior, sigue surgiendo un problema de disponibilidad, por lo que esta opción

tampoco resulta viable para techos donde sea necesario plantar más que una o dos decenas de estas plantas. El costo por planta es de \$11, por lo que a 8 plantas por cada 0,64m² el costo para cubrir 100m² asciende a \$13750. A su vez, cabe mencionar que estas plantas son más altas y presentan mayor resistencia al viento, por lo que se recomienda usar algún tipo de malla para evitar que sean arrancadas del techo, especialmente durante los primeros meses. Esto presentaría un costo adicional al elegir estas plantas. Adicionalmente, estas plantas necesitan de un sustrato profundo por lo cual es necesario que el sustrato de crecimiento tenga unos 20cm de profundidad, lo cual implica el mayor gasto en tierra de todas las opciones estudiadas.

5.1.4. Césped

Al contrario de los dos ejemplos anteriores, las variedades de césped recomendadas para el proyecto se consiguen fácilmente en muchos lugares, tanto en forma de panes, como en bolsas de semillas. El costo aproximado para una bolsa de un kilo de césped es de \$11 para la variedad Perenne y de \$44,50 para la variedad Bermuda. Usando 7 kilos por cada 100m² de Perenne y 1 kilo de Bermuda el costo total es de \$120,50. Esta es sin duda la opción más económica en cuanto al costo del material. A su vez, la profundidad del sustrato puede ser sumamente baja, de tan solo 10cm, lo cual se traduce en una reducción adicional del costo de instalación. No obstante, el césped requiere de mayor atención y mantenimiento, siendo indispensable el riego. Un sistema de riego por aspersión puede costar unos \$6000 por cada 100m² y puede ser instalado en la estructura teniendo cuidado de no causar daño a las membranas. La necesidad de cortar el césped puede resultar muy perjudicial para la capa de drenaje, ya que si bien sería capaz de resistir el peso, es recomendable mantener el tránsito por encima del techo verde a un mínimo. Esta preocupación podría ser exagerada, producto de una necesidad de sobreprotección de un componente tan vital del sistema. De no contar con alguna garantía por parte del fabricante, se aconseja realizar ensayos, al menos en forma preeliminar, sobre la respuesta de la membrana de drenaje a ser utilizada ante los esfuerzos a los que sería sometido antes de decidirse a implementar un sistema con césped. Es posible que el uso de una cantidad mayor de tierra sea suficiente para acolchonar el esfuerzo, eliminando la posibilidad de que ocurran daños en la membrana de drenaje.

5.1.5. Sustrato de crecimiento

El sustrato de crecimiento usado es el mismo, no importa cuál sea la elección de las plantas. Como fue mencionado anteriormente, se prepara usando una mezcla de tierra de bajo peso específico con perlita, la cual sirve para retener algo de agua, facilitando así la supervivencia de las plantas. Actualmente se comercializa un producto con dichas características a un costo de \$120/m³.

5.1.6. Costo total por planta

Usando los valores mencionados anteriormente se obtiene el costo material total para cada una de las opciones, el cual se ve representado en la Tabla 5.1.6-1:

	Costo material (para 100m ²)	Profundidad del sustrato de crecimiento (cm)	Costo de Tierra (para 100m ²)	Costo Total
Uña de Gato	\$ 1.400	15	\$ 1.803	\$ 3.203
Sedum Acre	\$ 37.500	18	\$ 2.164	\$ 39.664
Carex y Stipa	\$ 13.750	20	\$ 2.404	\$ 16.154
Césped	\$120,5 + \$6000	10	\$ 1.202	\$ 7.323

Tabla 5.1.6-1: Costo de las plantas.

Esta tabla muestra claramente que la opción más económica es la primera, la Uña de Gato (*Mesembryanthemum Edule*). Esto resulta conveniente, ya que es también la que menor mantenimiento requiere de todas las opciones, lo cual implica menores gastos luego de la puesta en marcha del sistema. El mayor gasto en mantenimiento para esta opción se da durante los primeros dos meses, en los cuales es necesario regar las plantas para asegurarse de que comiencen a crecer saludablemente. Sin embargo, este proceso es necesario para todas las demás opciones y tiene un costo despreciable frente a los costos materiales, tanto de las plantas y la tierra, como de los otros materiales.

5.2. COSTO DE LAS MEMBRANAS

El costo de las membranas a ser utilizadas depende necesariamente de las características particulares del techo sobre el cual se van a aplicar. Las variaciones en el precio pueden deberse por ejemplo a la escala del trabajo, a la redundancia funcional de las membranas (y por lo tanto, a poder prescindir de algunas de ellas), y la complejidad de la geometría del techo. También debe tenerse en cuenta si es necesario retirar la membrana impermeable existente para poder colocar una nueva, o si es conveniente instalar el techo verde sobre la membrana existente. Estas consideraciones pueden reducir drásticamente el costo final del proyecto. Junto con el costo material de las membranas se incluye el costo aproximado de instalación de las mismas. Estos valores se encuentran en la tabla a continuación:

	Precio	Unidad
Impermeabilización (pintura epoxi)	54,00	\$/m ²
Capa Drenante		
Plusdren ST70	5,20	U\$/m ²
Núcleo	3,80	U\$/m ²
Geotextil RT-08	0,83	U\$/m ²

Tabla 5.2-1: Costo de las membranas y placas necesarias por m² de material.

La impermeabilización usando pintura epoxi fue elegida al ser la más económica y práctica, basándose en una serie de presupuestos estimados por varias empresas para distintos tipos de impermeabilización. Bajo el costo de la placa drenante Plusdren ST70, se ubican dos costos de geotextiles que se pueden usar para el filtrado. El Plusdren ST70 se comercializa normalmente con un geotextil ya incorporado. En caso de querer usar otro geotextil para proveer un filtro adicional, se recomienda el uso del geotextil RT-08, comercializado por la misma empresa. En la siguiente tabla, los precios se ajustan para reflejar el costo aproximado para 100m² de techo en pesos argentinos, tomando el valor del dólar como \$3,80.

	Precio	Unidad
Impermeabilización (pintura epoxi)	5400	\$/100m ²
Capa Drenante		
Mano de Obra	250	\$/100m ²
Plusdren ST70	1997	\$/100m ²
Nucleo	1459	\$/100m ²
Geotextil RT-08	319	\$/100m ²
Mano de Obra	150	\$/100m ²

Tabla 5.2-2: Costo de las membranas y placas necesarias cada 100m² de material.

En esta tabla se incluye también el costo de la mano de obra para la colocación de la membrana drenante y del filtro geotextil, el cual será necesario para realizar el cálculo del costo final de la instalación.

5.3. COSTO FINAL DEL TECHO VERDE

El costo final del sistema será calculado tomando como consideración que se elige plantar la Uña de Gato en el techo del edificio (ver Tabla 5.3-1). Esta es sin duda la mejor opción de todas las presentadas, y es por eso que no se consideran las demás opciones en esta sección.

Componente	Costo
Uña de Gato	\$ 1.400
Mano de obra	\$ 200
Tierra preparada	\$ 1.803
Mano de obra	\$ 100
Placa drenante	\$ 1.997
Mano de obra	\$ 250
Filtro geotextil	\$ 319
Mano de obra	\$ 150
Impermeabilización	\$ 5.400
Total	\$ 11.619

Tabla 5.3-1: Costo de instalación para un techo verde de 100m².

Los costos de la tabla anterior están ajustados para una superficie de 100m², por lo que el costo por metro cuadrado sería de unos \$116, el cual es un buen costo competitivo comparado con el costo de instalación y mantenimiento de los sistemas tradicionales, el cual puede ser de entre 50\$/m² y 80\$/m². Algunas membranas impermeables de alto rendimiento alcanzan costos de instalación de 180\$/m². El costo de operación de un techo verde no es muy elevado, ya que no se espera que sea necesario mantenimiento ni cambio o reparación de la membrana impermeable durante unos 40 o 50 años. Es necesario contratar un jardinero que mantenga el techo verde en buen estado, el cual debería concurrir con una frecuencia bimestral durante los primeros 6 meses. Después de este periodo, es aconsejable que el jardinero realice mantenimiento cada 6 meses. Se estima un abono de \$50 por cada visita. A lo largo de 50 años, esto agrega un costo aproximado de \$5.100, lo cual haría que el costo total para instalar y mantener un techo verde en funcionamiento durante ese periodo, sea de aproximadamente \$16.119.

La impermeabilización del mismo techo, usando los mismos materiales, tendría un costo de \$5400, a lo cual se deben arreglar costos de reparación y mantenimiento. Se estima que sería necesario realizar estas tareas cada 5 años, a un costo aproximado de \$400 cada una. Tomando en cuenta que la vida útil de la membrana es de 25 años, el costo total de mantenimiento de la impermeabilización, durante 50 años (8 reparaciones y 2 instalaciones) sería de \$14.000.

6. REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES

Los requerimientos estructurales de un techo verde extensivo no son muy elevados, y suelen estar dentro de los parámetros de diseño de la mayoría de los edificios. Para un techo verde de entre 5 y 20cm de profundidad, la carga estructural sobre el techo es de entre 70 y 170kg/m². Existen lineamientos generales para calcular la carga de los componentes que pueden ser utilizados en caso de no contar con la información en forma directa, y pueden ser encontrados en los lineamientos publicados por la FLL. La carga ejercida por los componentes elegidos se encuentra en la siguiente tabla:

Componente	Presión	Unidad
Uña de Gato	10	kg/m ²
Tierra (peso saturado)	120	kg/m ²
Placa drenante	12	kg/m ²
Filtro geotextil	0,13	kg/m ²
Impermeabilización	1,5	kg/m ²
Total	143,63	kg/m ²

Tabla 6-1: Carga estructural de cada componente del techo verde.

En algunos casos va a ser necesario hacer un análisis estructural para determinar si el techo es capaz de resistir la carga adicional, pero no es común realizar refuerzos estructurales para cubiertas verdes extensivas.

7. CONCLUSIÓN

La principal diferencia entre la protección de un techo usando un sistema tradicional, y la instalación de un techo verde, es la diferencia entre un costo y una inversión. Proteger un techo tradicionalmente, usando una membrana impermeable, no lleva asociado mayor beneficio que dicha impermeabilización. Contrariamente, la instalación de un techo verde trae consigo una multiplicidad de beneficios que difícilmente pueden ser igualados por sistemas tradicionales de cobertura y protección de techos. Es posible usar tejas cerámicas, techos flotantes o el incremento de las capas de aislante térmico para reducir la temperatura del techo, o reducir la transferencia del calor a través del mismo, pero estos sistemas no proporcionan el beneficio agregado producido por la evapotranspiración, la cual elimina calor en forma activa. Regar el techo con agua imitaría este efecto en parte, pero a cambio de la incorporación de un proceso adicional, diario y que desperdicia netamente un recurso. Esta reducción en la transferencia y la eliminación activa de calor del techo se traduce en un beneficio económico tangible al reducir los requerimientos de acondicionamiento climático durante todo el año. El techo verde también ofrece soluciones en el manejo de agua de lluvia, el aislamiento acústico, e incrementa la vida útil de la membrana impermeable. Se trata de un sistema completo de protección, con beneficios tangibles tanto para el propietario del edificio, como para sus usuarios, el medioambiente y el entorno urbano.

Mediante la aplicación de un marco regulatorio adecuado, sería posible promover el uso de techos verdes como medida para solucionar importantes problemas, como las inundaciones, mientras se mejora el aire, se reduce el consumo energético, se reduce la temperatura ambiental, y se aumenta el atractivo visual del paisaje urbano. Más aún, esto se ve facilitado por la simplicidad del diseño de un techo verde y su facilidad de instalación.

Para el propietario del edificio, un techo verde ofrece la posibilidad de incurrir en una práctica de desarrollo sustentable que puede ser implementada fácilmente en edificaciones actuales. Muchos de los conceptos de sustentabilidad no son practicables en edificios existentes, ya que involucran aspectos como la orientación o la disposición de ventanas y ambientes. Es de esperar que, siguiendo los lineamientos adoptados en otros países, el uso de un techo verde ayude a conseguir subsidios o beneficios económicos basados en la promoción de construcciones ecológicas. En el Anexo IX se listan algunas formas de promocionar los techos

verdes en la Ciudad de Buenos Aires siendo estudiadas actualmente por el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

Finalmente, un techo verde puede aumentar el valor de una propiedad al proveer un espacio verde adicional en lo que es, generalmente, un espacio no diseñado para el acceso de los usuarios en una edificación típica. El que el edificio cuente con un jardín en su parte superior, podría aumentar el valor de departamentos y/o oficinas, al proveer a los usuarios la posibilidad de acceder a un espacio verde propio en vez de tener que recurrir a las plazas públicas.

7.1. ESTUDIOS FUTUROS

Existe una marcada necesidad de estudiar los problemas de localización de esta tecnología para su uso efectivo en la región. Las diferencias en los climas de Buenos Aires con los lugares donde se han realizado algunos de los estudios mencionados a lo largo de este trabajo, como Toronto, Berlín, Los Ángeles, Chicago, New York y Portland son muy grandes, por lo que es difícil efectuar estimaciones de ahorros y beneficios. Los calurosos veranos en Buenos Aires pueden posiblemente, implicar mayores beneficios que los reportados en estudios realizados en regiones con veranos más fríos. Llevar a cabo estudios como el publicado por Bass & Baskaran bajo el título *“Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas”* serían de gran utilidad para el desarrollo de esta tecnología en la región.

Otro aspecto de gran importancia es la necesidad de ampliar y catalogar el abanico de plantas que pueden ser usadas con éxito en cubiertas naturadas en el país. Cuantas más plantas sean estudiadas, más fácil será el diseño de techos verdes económicos, con mayor cobertura vegetal y por lo tanto, con mayores beneficios. A su vez, permitiría una mayor flexibilidad en el diseño estético del jardín, lo cual puede ser importante en algunos casos.

Sin dudas, el aspecto más importante a investigar y desarrollar en la región es el sistema de techos verdes modulares. Este sistema está reemplazando actualmente a los sistemas tradicionales en otros países. Contar con la capacidad de montar techos verdes modulares en techos existentes podría aumentar enormemente la tasa de expansión y adopción de esta tecnología debido a la simplicidad del sistema.

En definitiva, los techos verdes presentan un campo fértil para la investigación y el estudio local, que son vitales tanto para el desarrollo de la tecnología como para la creación de marcos regulatorios, estándares y planes de incentivo que sean acordes y consistentes con las características del sistema y su nivel desempeño de acuerdo al clima y las características locales.

8. ANEXO

8.1. ANEXO I: INCREMENTO EN EL NÚMERO DE TECHOS VERDES CONSTRUIDOS

Year	Total Annual Green Roof Infrastructure (m ²)
1982	-
1983	20,000
1984	50,000
1985	125,000
1986	300,000
1987	500,000
1988	700,000
1989	1,000,000
1990	1,400,000
1991	2,000,000
1992	2,800,000
1993	4,000,000
1994	5,700,000
1995	7,500,000
1996	10,000,000
1997	9,000,000
1998	10,000,000
Total*	55,095,000
Source: Industrierverband Bitumin dach und Dichkungsphanen, Frankfurt, Germany 1999	
* This represent approximately 10% of all of the flat roofs in Germany. Pers. communication, André Bruder, Soprema Inc., Strausborg, Oct. 22, 1999.	
Approximately 80% are covered with extensive green roof systems of grass that require less cost and maintenance than intensive systems.	

Tabla 8.1-1: Crecimiento en la cantidad de superficie con techos verdes en Alemania. (Fuente: Bass & Baskaran, 2003)

Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Totals
Annual Number of Buildings	20	30	50	100	200	400	800	1,200	1,800	2,700	7,300
Annual New Green Roof Area (m2)	10,000	15,000	25,000	50,000	100,000	200,000	400,000	600,000	900,000	1,350,000	3,650,000

Tabla 8.1-2: Proyección del incremento en la construcción de techos verdes (en edificios Federales). (Fuente: Bass & Baskaran, 2003)

Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Totals
% Total Market Penetration #	0.25%	0.35%	0.50%	0.75%	1.00%	1.50%	2.00%	3.00%	4.00%	5.00%	18%
Annual New Green Roof Area (m2)	83,596	117,034	167,192	250,788	334,384	501,576	668,768	1,003,152	1,337,537	1,671,921	6,135,949

Tabla 8.1-3: Proyección del incremento en la construcción de techos verdes (en edificios existentes). (Fuente: Bass & Baskaran, 2003)

Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Totals
% Total Market Penetration #	0.25%	0.35%	0.50%	0.75%	1.00%	1.50%	2.00%	3.00%	4.00%	5.00%	18%
Annual New Green Roof Area (m2)	6000	8400	12000	18000	24000	36000	48000	72000	96000	120000	440400

Tabla 8.1-4: Proyección del incremento en la construcción de techos verdes (en edificios nuevos). (Fuente: Bass & Baskaran, 2003)

8.2. ANEXO II: ALBEDO DE DISTINTAS SUPERFICIES

	Albedo (decimal)	Albedo (porcentaje)
Asphalt	< .10	< 10%
Water (overhead Sun)	.03-.05	3-5%
Forest	.05-.10	5%-10%
Soil	.11-.20	11-20%
Grass	.20-.25	20-25%
Sand	.20-.30	20-30%
Evergreen vegetation	.31-.40	31-40%
Developed terrain (concrete, buildings etc.)	.51-.71	51-70%
Water (sun near horizon)	.50-.80	50-80%
Thick cloud	.70-.80	70-80%
Fresh snow/ice	.70-.85	70-85%

Tabla 8.2-1: Albedo correspondiente a distintos materiales. (Fuente: <http://education.gsfc.nasa.gov>)

8.3. ANEXO III: MITIGACIÓN DEL EFECTO ISLA DE CALOR

		NYC	Mid-Manhattan	Lower Manhattan	Fordham	Maspeth	Crown Heights	Ocean Parkway
50% Open Space Planting	Max MW	13.40	0.238	0.654	0.363	0.487	0.199	0.379
	Ave On-Peak MW	13.144	0.234	0.620	0.351	0.467	0.193	0.379
	MWh	19,122	594	831	765	728	350	769
50% Curbside Planting	Max MW	29.48	1.621	3.494	0.878	0.620	0.985	1.910
	Ave On-Peak MW	29.439	1.621	3.475	0.878	0.615	0.975	1.910
	MWh	59,177	3,325	7,002	1,826	1,259	2,019	3,781
50% Urban Forestry	Max MW	42.20	1.876	4.058	1.223	1.096	1.165	2.257
	Ave On-Peak MW	42.201	1.876	4.023	1.221	1.077	1.152	2.257
	MWh	77,991	3,930	7,776	2,595	1,986	2,359	4,553
50% Living Roofs	Max MW	37.88	4.844	6.967	1.091	1.034	1.023	2.196
	Ave On-Peak MW	37.876	4.819	6.922	1.083	1.026	1.014	2.196
	MWh	74,346	10,146	13,874	2,289	2,011	2,106	4,537
50% Light Roofs	Max MW	38.73	4.304	6.709	0.922	1.067	0.972	1.976
	Ave On-Peak MW	38.382	4.260	6.498	0.885	1.038	0.946	1.961
	MWh	68,518	7,235	11,215	1,552	1,766	1,648	3,298
50% Light Surfaces	Max MW	52.95	4.974	8.012	1.225	1.331	1.183	2.470
	Ave On-Peak MW	52.472	4.922	7.742	1.170	1.295	1.151	2.449
	MWh	94,291	8,377	13,436	2,073	2,249	2,028	4,162
Ecological Infrastructure	Max MW	170.49	12.895	22.699	4.222	4.464	4.330	8.411
	Ave On-Peak MW	170.486	12.841	22.546	4.222	4.431	4.272	8.411
	MWh	343,949	26,693	45,924	8,729	9,058	8,928	16,868
Urban Forestry + Light Roofs	Max MW	164.97	11.995	21.759	4.089	4.501	4.237	8.222
	Ave On-Peak MW	164.741	11.927	21.350	4.026	4.395	4.185	8.214
	MWh	308,555	21,601	39,310	7,780	8,097	7,988	15,034
Urban Forestry + 25% Living Roofs + 25% Light Roofs	Max MW	80.72	6.176	10.755	2.117	2.131	2.125	4.216
	Ave On-Peak MW	80.507	6.161	10.676	2.108	2.106	2.101	4.216
	MWh	153,490	12,431	20,660	4,331	3,980	4,232	8,241

Tabla 8.3-1: Reducción en la demanda energética según la medida de mitigación implementada. (Fuente: Rosenzweig et al., 2006b)

	NYC	Mid-Manhattan	Lower Manhattan	Fordham	Maspeth	Crown Heights	Ocean Parkway
50% Open Space Planting	0.13%	0.04%	0.06%	0.15%	0.21%	0.11%	0.15%
50% Curbside Planting	0.28%	0.24%	0.34%	0.36%	0.26%	0.56%	0.75%
50% Urban Forestry	0.41%	0.28%	0.39%	0.50%	0.47%	0.66%	0.88%
50% Living Roofs	0.36%	0.73%	0.67%	0.44%	0.44%	0.58%	0.86%
50% Light Roofs	0.37%	0.65%	0.65%	0.38%	0.45%	0.55%	0.77%
50% Light Surfaces	0.51%	0.75%	0.77%	0.50%	0.57%	0.67%	0.97%
Ecological Infrastructure	1.64%	1.94%	2.19%	1.72%	1.90%	2.45%	3.29%
Urban Forestry + Light Roofs	1.59%	1.81%	2.10%	1.67%	1.92%	2.39%	3.21%
Urban Forestry + 25% Living Roofs + 25% Light Roofs	0.78%	0.93%	1.04%	0.86%	0.91%	1.20%	1.65%

Tabla 8.3-2: Reducción porcentual en la máxima demanda energética según la medida de mitigación implementada. (Fuente: Rosenzweig et al., 2006b)

8.4. ANEXO IV: ESTUDIO DE LA TEMPERATURA DE LA MEMBRANA IMPERMEABLE.

Temperature Greater Than:	Reference Roof		Green Roof		Ambient	
	No. of Days	% of Days	No. of Days	% of Days	No. of Days	% of Days
30°C (86°F)	342	52	18	3	63	10
40°C (104°F)	291	44	0	0	0	0
50°C (122°F)	219	33	0	0	0	0
60°C (140°F)	89	13	0	0	0	0
70°C (158°F)	2	0.3	0	0	0	0

Tabla 8.4-1: Máxima temperatura diaria observada en la temperatura de las membranas durante el periodo de observación (660 días en total). (Fuente: Liu & Baskaran, 2003)

8.5. ANEXO V: EDIFICIO ESTUDIADO EN LA INVESTIGACIÓN DE BASS & BASKARAN.

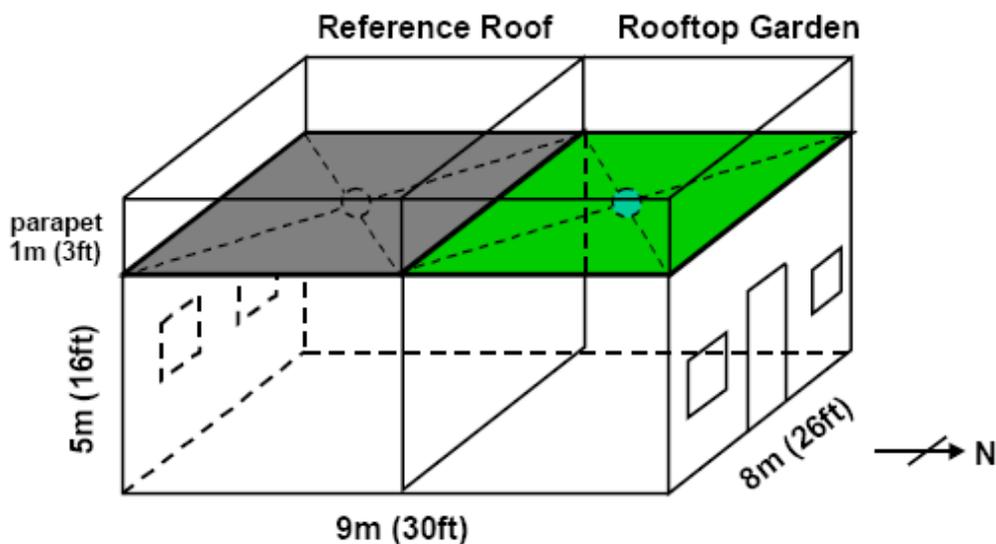


Figura 8.5-1: Esquema del Filed Roofing Facility (FRF), el edificio usado para la experimentación. (Fuente: Bass & Baskaran, 2003)



Figura 8.5-1: Fotografía del Filed Roofing Facility (FRF) tomada en Junio del 2001.
(Fuente: Bass & Baskaran, 2003)

8.6. ANEXO VI: SISTEMAS MODULARES GREENTECH (TM)

GreenGrid™ Modules:



Interior of Module



Bottom of Module

GreenGrid™ Product Specifications:

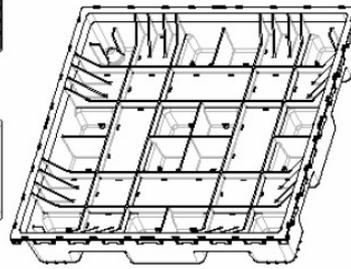
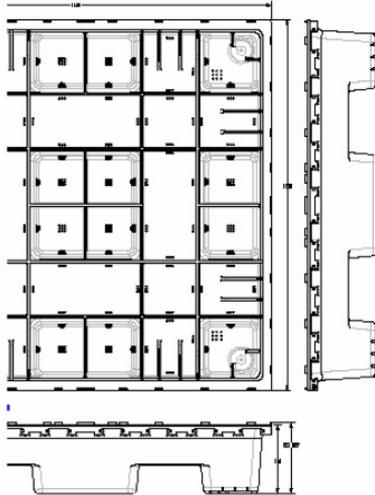
ELEMENT DESCRIPTION

- Modules:
Standard – 2' x 4' and 2' x 2'; Depth of modules (two depths) – 4" and 8"; Also 2' x 2' x 2" depth
Two inch depth modules weigh 10 lbs. wet
Four inch depth modules weigh 15 lbs. wet
Eight inch depth modules weigh 28 lbs. wet
- Pavers:
Length – 2 ft., width – 2 ft., depth – 1.5 in; Paver material - Recycled automobile tires; Paver Colors - Forest green, black, brick
- Drainage/root barrier medium:
Geotextile
- Soil media:
Proprietary mixture consisting of organic and inorganic material
- Drip irrigation system:
Black polystyrene tubing
- Edge treatments:
Wood, composite recycled HDPE/wood (in various colors and designs), various others to order
- Plants:
Perennials, grasses or shrubs specifically selected for climate, hardiness zone, color and size.

GreenTech® Module:



GreenTech® Product Specifications:



Dimensions: 46"W x 46"L
Depth: 8" minimum to any desired depth or shape
Material: High density polyethylene
Tributary Area (ft²): 14.4
Total Surface Contact Area (in²): 625
Draining Capacity: equates to 6" pipes 21" on center in **both directions**
Volume: 10 Cu. Ft. at 11 1/2" depth

Weight Specifications:

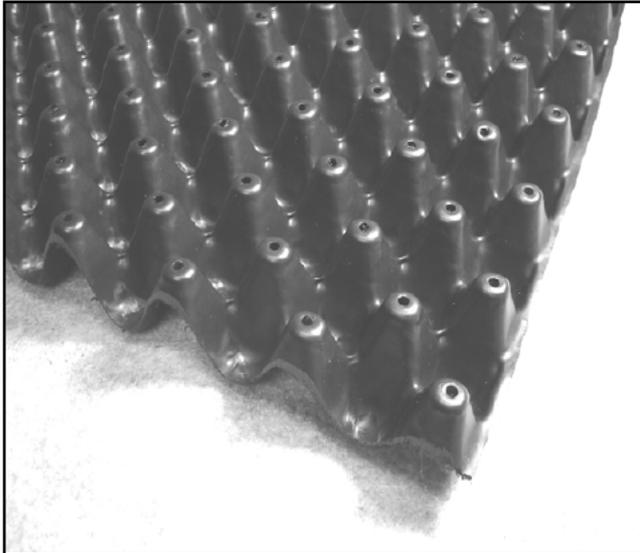
Soil Mixture (saturated)	Light Mix (psf)	Heavy Mix (psf)	Sand
8 1/2 in. with module:	26	41	55
8 1/2 in. soil without module:	42.5	59.5	93.5
% of weight savings with module	38.8%	31.1%	41.2%
11 1/2 in. with module:	41	62	85
11 1/2 in. soil without module:	57.5	80.5	126.5
% of weight savings with module	28.7%	22.4%	32.8%
Weight of additional soil above 11 1/2 in (psf/in)	5	7	11

8.7. ANECO VII: INFORMACIÓN TÉCNICA DE LAS PLACAS DE DRENAJE Y MEMBRANAS GEOTEXTILES

	S 70 ST	S 80 ST	S 150 ST
PROPIEDADES DEL GEOTEXTIL			
Resistencia a la tracción	ASTM D4595	kN/m	4,50
Resistencia al punzonado CBR	ISO 12236	kN	0,70
Desgarre trapezoidal	ASTM D4533	N	110
Resistencia al reventado Müllen	ASTM D3786	kPa	800
Abertura de filtración (O95)	ISO 12956	micrones	120
Permeabilidad	ASTM D4491	cm/seg	2,4 x 10 ⁻¹
Flujo de agua normal al plano	ASTM D4491	litros/seg /m ²	90
PROPIEDADES DEL NÚCLEO			
Material			Polietileno de Alta Densidad / Poliestireno
Altura de los nódulos		mm	7 8 15
Resistencia a la compresión	ASTM D1621	kPa	320 400 500
Capacidad de descarga	ASTM D4716	litros/seg/m de ancho	4,60 2,90 6,00
PRESENTACIÓN			
Rollos / Placas		mm	Rollos 2 x 25 Placas 0,83 x 1,20 Placas 0,83 x 1,20



GARDENDRAIN™ GR30 PRODUCT DATA SHEET



GENERAL DESCRIPTION

Gardendrain GR30 is made of recycled polyethylene, molded into a three-dimensional panel. The unique design provides retention cups on the top side, drainage channels on top and bottom and holes in the tops of the “domes” for ventilation and evaporation.

BASIC USE

Gardendrain GR30 is specifically designed to act as a drainage and water retention element in Hydrotech's Garden Roof® Assembly. It is typically utilized under both extensive and intensive landscaping.

TECHNICAL DATA

PANEL DIMENSIONS:	4 ft. X 6 ft. (1.2 m X 1.8 m)
PANEL HEIGHT:	1 1/4 in. (30 mm)
WEIGHT: w/cups empty	0.3 lb/ft ² (1.5 kg/m ²) – dry; 1.6 lb/ft ² (7.9 kg/m ²) - wet
w/cups filled	2.4 lb/ft ² (12 kg/m ²) – dry; 3.8 lb/ft ² (19.2 kg/m ²) - wet
COMPRESSIVE	
STRENGTH: (ASTM D1621)	5,069 lb/ft ² (cups empty); 13,000+ lb/ft ² (cups filled)
FLOW RATE: (ASTM D4716)	38 gal./min./ft. width (479 l./min./m.); h.g. = 1
WATER RETENTION:	≈0.16 gal/ft ² (6.6 l/m ²) cups empty; ≈0.18 gal/ft ² (7.6 l/m ²) cups filled
VOLUME TO FILL:	≈0.04 cu.ft. for every 1 sq. ft. in area (1.2 liters)
* cups filled = Gardendrain element filled with LiteTop® expanded aggregate level with tops of element dimples	

8.8. ANEXO VIII: PLANTAS USADAS FRECUENTEMENTE EN TECHOS VERDES

Plantas usadas frecuentemente en la construcción de techos verdes	
Abretia	Muhlenbergia rigens
Allium schoenoprasum	Opuntia violacia santa-rita
Aloe nobilis	Phloxes
Ameria	Sedum acre 'Aureum'
Anntenaria	Sedum album
Boutela gracilis	Sedum album 'Murale'
Carex glauca	Sedum floriferum 'Weihenstephaner Gold'
Carex stricta	Sedum kamtschaticum
Carex testacea	Sedum reflexum
Delosperma Alba	Sedum sexangulare
Delosperma cooperii	Sedum sieboldii
Delosperma nubigenum 'Basutoland'	Sedum spathulifolium
Dudleya hassei	Sedum spurium 'Fuldaglut'
Dudleya Pulverulenta	Sedum spurium 'John Creech'
Echinocactus grusonii	Sedum spurium 'Roseum'
Festuca scoparia	Sedum spurium 'White Form'
Kalanchoe beharensis	Sempervivum
Lampranthus deltoides	Talinum calycinum
Lampranthus productus	

Tabla 8.5-1: Lista de plantas usadas en la construcción de techos verdes.

8.9. ANEXO IX: MEDIDAS DE PROMOCIÓN DE TECHOS VERDES

INSTRUMENTOS DE PROMOCION DE CUBIERTAS VERDES

El salto de la construcción individual a la creación de una infraestructura urbana sustentable no puede hacerse sin la creación de legislación e instrumentos de promoción que apoyen la construcción sustentable. Hacen falta proyectos demostrativos, incentivos y normas que promuevan la instalación de cubiertas verdes y que a su vez compensen los costos y estimulen el mercado. Ciudades como Tokio y Toronto han demostrado que se puede incentivar la construcción de techos verdes a través de legislación y financiación municipal.

Existen distintos instrumentos que pueden aplicarse al fomento de cubiertas verdes en la Ciudad de Buenos Aires. Para abordar una propuesta que sea integradora y pueda aplicarse a escala urbana, debemos diferenciar las distintas categorías constructivas que se nos presentan y tenerlas en cuenta a la hora de desarrollar cada una de estas herramientas. Principalmente nos concentraremos en la diferenciación entre construcciones **nuevas** y **existentes**, y unidades **únicas** (a cargo de un solo propietario) y **múltiples** (consorcios).

Instrumentos normativos - Alternativas

a) Modificaciones en el código de edificación

- Inclusión de un artículo específico relacionado a la temática que sirva como marco para la construcción de una cubierta verde con los parámetros que se establezcan.
- Modificación en cuanto a los estímulos a la edificación privada. Se adjudicarán incentivos y contribuciones a los edificios que acusen una mejor unidad arquitectónica como solución de un programa desarrollado en conjunto. Se pueden considerar las siguientes exenciones impositivas:
 - Ingresos brutos: por ejemplo, serán beneficiarios los Comercios e Industrias que construyan cubiertas verdes en sus edificios nuevos o construidos mediante la exención del Impuesto sobre los Ingresos Brutos durante un plazo de X años.
 - ABL: Reducción del pago de las Contribuciones de Alumbrado, Barrido y Limpieza, Territorial y de Pavimentos y Aceras establecidas en el Título III del Código Fiscal, durante un plazo de X años a quienes construyan y mantengan Cubiertas Verdes en edificios existentes.
 - Derechos de construcción: Están exentas del pago del Derecho de Delineación y Construcciones sobre la superficie de la cubierta verde y/o un porcentual de la superficie construible, establecido en el Título IV del Código Fiscal de la Ciudad.
 - Consideración: En caso que el/los titular/es no cumpla/n con la construcción y mantenimiento de la cubierta verde deberá/n pagar la diferencia no abonada por estos beneficios, más una multa del 100% del valor de los beneficios al valor de la fecha de constatación de la infracción.

*b) Modificaciones en el **código de planeamiento***

- Uso del suelo urbano: Se debe instrumentar una política que aliente el desarrollo de los espacios verdes del ámbito privado, como los pulmones de manzana, donde se sustituyan solados secos por verdes en viviendas múltiples ó únicas, lo que generaría sectores verdes de índole privado.
- Incremento del FOT y FOS: Incremento del FOT y/o aumento del uso del FOS a quien construya Cubiertas Verdes en edificios nuevos y existentes según evaluación de la Autoridad de Aplicación.
- Morfología edilicia: Permiso de sustituir techos a dos aguas por azoteas horizontales a la altura de cumbra, a viviendas existentes, locales industriales y comerciales que construyan en las mismas Cubiertas Verdes.

*c) Elaboración de **legislación específica***

- Proyecto de Ley, sobre cubiertas verdes y/o sobre construcción sustentable y que incluya el tema, sea de cumplimiento o de promoción.

Instrumentos financieros y económicos

a) Subsidios

Con el objeto de incentivar el desarrollo de construcciones de Cubiertas Verdes, la Agencia de protección Ambiental, a través suyo o conviniendo con otras áreas del gobierno ú organismos privados o internacionales, otorgará aportes no reembolsables a favor a los propietarios privados que encuadren en el listado de categorías, destinado a financiar, por ejemplo, hasta el cincuenta por ciento (50%) de la diferencia entre el costo de la construcción tradicional y el costo de la construcción de la cubierta verde, o mediante concurso de proyectos.

b) Créditos

El Banco de la Ciudad de Buenos Aires adopta las medidas necesarias para implementar líneas de crédito preferenciales tendientes a promover la construcción de Cubiertas Verdes

- En lo que respecta a los préstamos, el Banco Ciudad de Buenos Aires administrará los recursos en todo lo concerniente a los aspectos bancarios del otorgamiento y la Autoridad de Aplicación será la encargada de evaluar los proyectos que se presenten.

9. BIBLIOGRAFÍA

Bass, B. y Baskaran, B. 2003. Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas. Institute for Research in Construction. National Research Council Canada.

Bass, B., Krayenhoff, E.S., Martilli, A., Stull, R. B. y Auld, H. 2003. The impact of green roofs on Toronto's urban heat island. Proceedings of Greening Rooftops for Sustainable Communities. Chicago, Illinois.

Berghage, B., Jarret, A., Beattie, D., Kelley, K. Husain, S., Rezai, F., Long, B., Negassi, A., Cameron, R. y Hunt, W. 2007. Quantifying Evaporation and Transpirational Water Losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain. Center for Green Roof Research. Pennsylvania State University.

BES, 2004. Ecoroof Questions and Answers. Bureau of Environmental Services, City of Portland. <http://www.portlandonline.com>. Página vigente al 29 de Julio del 2009.

Christian, J.E. y Petrie, T.W. 1996. Sustainable Roofs with Real Energy Savings, Proceedings of the Sustainable Low-Slope Roofing Workshop. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee.

City of Indianapolis, 2008. Indianapolis Stormwater green infrastructure guidance: Green roofs. Department of Public Works. City of Indianapolis.

Coripa. <http://www.coripa.com.ar>. Página vigente al 4 de Agosto del 2009.

CSI, 2007. The Construction specifier. Solutions for the Construction Industry. Waterproofing Design Options for Green Roofs.

EAD, 2007. Green Roofs – Cooling Los Angeles, A Resource Guide. Environmental Affairs Department. City of Los Angeles.

Estudio Thays. <http://www.estudiothays.com.ar>. Página vigente al 4 de Agosto del 2009.

Fairmont, 2009. "Hotel Events: The Fairmont Waterfront Hotel Vancouver". The Fairmont Waterfront Hotel.

http://www.fairmontmeetings.com/waterfront/location_04.html. Pagina vigente al 29 de Julio del 2009.

Herman, R. 2003. Green Roofs in Germany: Yesterday, Today and Tomorrow. Proceedings Greening Rooftops for Sustainable Communities. Chicago, Illinois.

Kreimer, A., Kullock, D. y Valdés, J. B. 2001. Inundaciones en el Área Metropolitana de Buenos Aires. Disaster Risk Management Working Papers. The World Bank.

Laberge, K. 2003. Urban Oasis: Chicago's City Hall Green Roof. Proceedings Greening Rooftops for Sustainable Communities. Chicago, Illinois.

Liesecke, H.J. 1999. Extensive begrünung bei 5° dachneigung. Stadt Grün. Número 48. Páginas 337–346.

Liesecke, H-J., Krupka, B. y Brueggemann, H. 1989. Grundlagen der Dachbegruenung Zur Planung, Ausfuehrung und Unterhaltung von Extensivbegruenungen und Einfachen Intensivbegruenungen. Patzer Berlag. Berlin – Hanover.

Liu, K. y B. Baskaran. 2003. Thermal Performance of Green Roofs Through Field Evaluation. Institute for Research in Construction. National Research Council Canada.

Liu, K. y Bass, B. 2005. Performance of Green Roof Systems. Institute for Research in Construction. National Research Council Canada.

Liu, K. y Minor, J. 2005. Performance of evaluation of an extensive green roof. Institute for Research in Construction. National Research Council Canada.

Miller, 2003. Extensive Green Roofs. Whole Building Design Guide. <http://www.wbdg.org/resources/greenroofs.php>. Página vigente al 2 de Agosto del 2009.

Moran, A. 2004. A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quality, runoff quantity, and plant growth. North Carolina State University.

Moran, A., B. Hunt, and G. Jennings. 2003. A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quality, runoff quantity, and plant growth. ASAE Paper 032303. Am. Soc. of Agric. Eng., St. Joseph, MI.

Neufert, P. y Neff, L. 1999. Casa – Vivienda – Jardín. 256 Páginas. Editorial Gustavo Gili, SA. ISBN 842-5220-95-5.

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman Reid R., Doshi H., Dunnet N., Gaffin S., Köhler M., Liu K. y Rowe B. 2007. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions and Services. BioScience Volumen 57. Numero 10.

Onmura S., Matsumoto M. y Hokoi S. 2001. Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. Energy and Buildings. Volumen 33. Número 7. Páginas 653–666.

Peck, S., Callaghan, C., Kuhn, M. y Bass, B. 1999. Greenbacks from Green Roofs: Forging A New Industry In Canada. www.greenroofs.org. Página vigente al 2 de Agosto del 2009.

Porsche, U. y Kohler, M. 2003. Life Cycle Costs of Green Roofs: A Comparison of Germany, USA, and Brazil. World Climate and Energy Event.

Rosenzweig, C., Gaffin, S., y Parshall, L. 2006a. Green Roofs in the New York Metropolitan Region: Research Report. NASA/Goddard Institute for Space Studies.

Rosenzweig, C., Solecki, W., y Slosberg, R. 2006b. Mitigating New York City's Heat Island with Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces. New York City Regional Heat Island Initiative. New York.

Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B. y Pressnail, K. 2006. Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs. Environmental Science and Technology. Número 40. Páginas 4312-4316.

Schade, C. 2000. Wasserrückhaltung und Abflußbeiwerte bei dünn-schichtigen extensivbegrünungen. Stadt Grün. Número 49. Páginas 95–100.

Suman, B. M. y Srivastava, R. K. 2009. Influence of conductive heat transfer through roof ceiling construction. Journal of Scientific & Industrial Research. Volumen 68. Páginas 248-251.

USEPA. 2000. US Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/>. Página vigente al 1 de Agosto del 2009.

VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, D.B., Rugh, C.L., y Xiao, L. 2005. Watering regime and green roof substrate design impact. Sedum plant growth. HortScience. Número 40.

Water Works UK, 2009. "Water Works UK: Green Roof Water Recycling System (GROW)". Water Works UK. <http://www.wwuk.co.uk/index.htm>. Pagina vigente al 29 de Julio de 2009.

Wong, N.H., Tay, S. F., Wong, R., Ong, C. L. y Sia, A. 2003. Life Cycle Cost Analysis of Rooftop Gardens in Singapore. Building and Environment. Volumen 38. Número 3. Páginas 499-509.