

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Aragón

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE AZOTEA Y MUROS VERDES EN UNA VIVIENDA ECOLÓGICA A ESCALA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL

PRESENTA:

Michelle Noria Govea

Y DE

INEGENIERO CIVIL

PRESENTA:

Jorman Noé Pérez Rivas

ASESORA:

M. en C. Marjorie Márquez Vázquez.

CIUDAD NEZAHUALCÓYOTL, ESTADO DE MÉXICO
MARZO 2020





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra amada FES Aragón por brindarnos las herramientas, los espacios y a los docentes que proveyeron los conocimientos, consejos y los valores que contribuyeron para que nuestra formación sea completa y hoy día logremos superarnos día a día como profesionales y como ciudadanos que contribuyen asertivamente en la mejora de nuestra sociedad.

A nuestros asesores de tesis la M. en C. Marjorie Márquez Vázquez y el M. en C. Sergio Alfonso Martínez González, que también fueron nuestros profesores y amigos, agradecerles por su paciencia, apoyo, los consejos tanto en lo profesional como personal y por invitarnos a colaborar en importante tema. Les deseamos sigan despertando el entusiasmo del estudiantado para adentrarse a los temas de la ingeniería, la ciencia y sustentabilidad con su admirable capacidad de enseñar, que sigan cosechando éxitos en el desarrollo académico de futuras generaciones, profesionalmente en sus carreras como también en lo personal.

A la bióloga Araceli Gutiérrez de la Rosa por su actitud cortés y servicial, por compartirnos su conocimiento para el cuidado de las plantas utilizadas en el proyecto, por cada uno de los materiales que amablemente nos donó para su creación quien también nos apoyó con el alojamiento de las plantas utilizadas en su invernadero y en todo lo que estaba en su alcance sin siquiera pedirlo, de verdad muchas gracias.

A los estudiantes de Ingeniería Civil que con su Servicio Social nos apoyaron en todas las etapas de la construcción de la vivienda ecológica a escala y por su compañía que nos hizo más ameno el trabajo diario.

Al Centro Tecnológico Aragón, sede del conocimiento, por brindarnos el espacio para llevar a cabo nuestro Servicio Social así como para la construcción de nuestra vivienda ecológica a escala.

A la maravillosa persona llamada Yuri que conocimos en nuestras escapadas al gimnasio de la facultad, quien nos apoyó en el proceso de los trámites administrativos para el registro de la tesis.

A la administrativa de Secretaría Académica de la cual lamentablemente no sabemos su nombre pero siempre fue muy amable y cortés al orientarnos en los procesos de trámite para presentar la tesis, reconocemos el amor con el que hace su trabajo.

MICHELLE NORIA GOVEA

A mi madre por ser una mujer inteligente, valiente y amorosa. Gracias por tu sacrificio y trabajo duro que me ha permitido tener educación; gracias por inspirarme a ser una buena persona y luchar por lo que quiero.

A mi hermano Rodrigo por creer en mí, por apoyarme en todo y trabajar arduamente para ayudar a su familia. Gracias por guiarme como un padre.

A mis hermanas Paola y Mirian por su amor, su cariño y por estar ahí siempre en los buenos y malos momentos.

A mi tía Guadalupe, a mi tío Leonardo y a mis primos Jorge y Lucy por su apoyo incondicional y aportarme conocimiento durante este proceso.

A mi mejor amigo Jorman con quien disfrute haciendo la tesis. Gracias por tu compañía que hizo el proceso más ameno y divertido. Deseo que este sea uno de muchos logros que podamos compartir.

JORMAN NOÉ PÉREZ RIVAS

A Dios, por concedernos el milagro de vivir, por todas sus obras y milagros en mi vida y en la vida de quienes amo. A mis padres, por brindarme el apoyo toda la vida, por su apoyo moral, económico y por hacer hasta lo imposible para darme estudios. A mi hermana María Vanessa por aconsejarme y mostrarme el camino para triunfar y conseguir mis metas. A Michelle por invitarme a trabajar la tesis de manera conjunta, por ser mi amiga y ser una excelente colaboradora de trabajo tanto en lo académico como en lo profesional que junto con Karla y Gabriela, siempre las llevo en el corazón, de ellas tengo gran respeto, gran admiración y ellas tienen todo mi apoyo para toda la vida. A las buenas personas Dios ha puesto en mi camino para no perderme y para protegerme.



Dirección General de Asuntos del Personal Académico

Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM- DGAPA -PAPIME
Proyecto PAPIME PE105816 "La sustentabilidad aplicada en la Ingeniería
Civil".

Se agradece por la beca otorgada a la alumna Michelle Noria Govea para el
desarrollo de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
CONTAMINACIÓN POR RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	8
CONTAMINACIÓN POR GASES EFECTO INVERNADERO Y CALENTAMIENTO GLOBAL	9
IMPORTANCIA DEL ENFOQUE SUSTENTABLE EN EL DESARROLLO URBANO	10
CAPÍTULO I. MUROS Y TECHOS VERDES	12
MARCO HISTÓRICO	13
JARDINES COLGANTES DE BABILONIA (SIGLO VI A.C)	13
EDAD MODERNA Y CONTEMPORANEA (SIGLO XV-XXI)	13
DESARROLLO DE MUROS Y TECHOS VERDES EN ALEMANIA (1960)	13
LLEGADA A MÉXICO	15
MURO VERDE	15
DEFINICION	15
CLASIFICACIÓN	16
ELEMENTOS DEL SISTEMA	19
COSTOS DEL SISTEMA	22
TECHO VERDE	25
DEFINICIÓN	25
CLASIFICACIÓN	25
ELEMENTOS DEL SISTEMA	29
COSTOS DEL SISTEMA	32
SUSTRATO	33
CLASIFICACIÓN	33
SUSTRATOS EMPLEADOS EN MUROS Y TECHOS VERDES	33
VEGETACIÓN EMPLEADA EN SISTEMAS DE NATURACIÓN	35
CLASIFICACION	35
ESPECIES AUTOCTÓNAS	36
VEGETACIÓN EN FACHADAS VERDES DIRECTAS E INDIRECTAS	37
VEGETACIÓN EN PAREDES VIVIENTES (LIVING WALLS)	39
VEGETACIÓN EN TECHOS VERDES	39
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SITEMAS VERDES	41
VENTAJAS	41
DESVENTAJAS	54
INGENIERIA DE MUROS Y AZOTEAS VERDES	56
PARÁMETROS DE CARGAS	57
PARÁMETRO DE DRENAJE.	58

CAPÍTULO 2. VIVIENDAS ECOLÓGICAS.	59
DEFINICIÓN	59
EDIFICACIÓN VERDE	59
BENEFICIOS	59
CERTIFICACIONES DE ORDEN INTERNACIONAL (LEED, LIVING BUILDING CHALLENGE DEL INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE, BREAM)	60
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ECOLÓGICOS Y DE ORIGEN NATURAL	64
CONSTRUCCIÓN CON BAMBÚ	64
POLIETILENO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	70
CONCRETO TRANSLÚCIDO	78
CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUA DE PLUVIAL.	82
COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL	84
IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA	86
CAPÍTULO 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE AZOTEA Y MUROS VERDES EN UNA VIVIENDA ECOLÓGICA	90
DISEÑO DE PROTOTIPOS	90
MATERIALES EMPLEADOS	95
BOTELLAS DE PET	95
BAMBÚ	100
CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA ECOLÓGICA A ESCALA	101
ETAPA PRELIMINAR DE LA CONSTRUCCIÓN	101
ELABORACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE BAMBÚ	104
MUROS CON LADRILLOS ECOLÓGICOS	106
ELABORACIÓN DE TECHO Y VENTANAS	111
SELECCIÓN DE PLANTAS	112
CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE FACHADAS, MURO Y AZOTEA VERDES	114
PARED VIVIENTE CON SISTEMA HIDROPÓNICO	114
FACHADA VERDE INDIRECTA CON REJA DE PVC	116
MURO VIVIENTE CON SISTEMA SUELO-CELDA	118
TECHO VERDE EXTENSIVO	120
COSTO DE MATERIALES PARA LOS SISTEMAS VERDES.	122
COMPORTAMIENTO DE LA VEGETACIÓN	122
RECOMENDACIONES	123
MANEJO DE BAMBÚ	123
MANEJO DE LOS LADRILLOS ECOLÓGICOS	124
SISTEMAS DE NATURACIÓN	125
CONCLUSIONES	126
REFERENCIAS	128

RESUMEN

El presente trabajo, forma parte del proyecto PAPIME PE105816, titulado “La Sustentabilidad Aplicada a la Ingeniería Civil” , y consta de la construcción de un sistema verde para una edificación a escala piloto, constituido por muros, fachadas y azoteas verdes, el cual tiene como objetivo mostrar, específicamente a la comunidad universitaria, esta alternativa de solución a diversas problemáticas de carácter ecológico (efecto isla de calor, contaminación del aire, del recurso hídrico, contaminación acústica, etc) , económico (pobreza, escases de alimentos, etc.) y social (mejora de la calidad de vida, recuperación de los espacios verdes, mitigación del impacto ambiental), también probar que la utilización de múltiples tecnologías ecológicas e ingenieriles conjuntas aplicadas en este proyecto, genera el desarrollo de numerosas ventajas de las edificaciones sustentables sobre las convencionales. En el ámbito ingenieril, manifestar el buen desempeño del comportamiento estructural empleando tecnologías ecológicas como el ladrillo ecológico (PET relleno de arena compactada), materiales reciclables como el PET y el uso de materiales con procedencia natural como el bambú y el material terroso, que no son comúnmente usados en la construcción. En una segunda fase, estudiar su eficacia en mitigación del impacto ambiental, monitoreando la eficiencia térmica y otros parámetros medibles.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se enfrentan problemas de contaminación ambiental como consecuencia de las actividades humanas, como son el calentamiento global, contaminación del suelo, mantos acuíferos y aire. Todo esto tiene un impacto en la calidad de vida del planeta como lo muestra la figura 1.1.



Figura 1.1. (1) Ejemplo de emisiones de CO₂. Otodo/flickr, 2016. (2) Fuertes Lluvias en Kyoto. AFP/Getty Images, 2018. (2018). (3) Botellas de PET en la playa. Sin Autor, 2018. (4) Contaminación del aire. Ng Han Guan, 2015.

CONTAMINACIÓN POR RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

La sobrepoblación, las actividades humanas modernas y el consumismo provocan un considerable aumento en la cantidad de residuos generados. El hombre contemporáneo fabrica infinidad de artículos para satisfacer una creciente demanda y agregando la ineficiencia con que los residuos son manejados, conduce a la acumulación de un gran volumen de desechos. Por ejemplo, según la SEMARNAT tan solo en México se generan diariamente 102,895.00 toneladas de residuos, de los cuales se recolectan 83.93% y se manipulan en sitios de disposición final 78.54%, reciclando únicamente el 9.63% de los

residuos generados, el resultado obtenido es la contaminación de aguas, suelos y aire, manifestándose en problemas de salud pública y efectos adversos sobre el ambiente, además de conflictos sociales y políticos. (Muñoz, 2012, p. 1)

CONTAMINACIÓN POR GASES EFECTO INVERNADERO Y CALENTAMIENTO GLOBAL

Sobre el problema de cambio climático esto es lo que exponen las Naciones Unidas (2018):

Las personas viven las consecuencias del cambio climático, que incluyen alteraciones en los patrones del tiempo, el aumento del nivel del mar y fenómenos meteorológicos más extremos. Las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por las actividades humanas hacen que esta amenaza aumente. Incluso, no existen registros precedentes con emisiones de la magnitud actual. Si no se emplean medidas restaurativas, la temperatura media de la superficie del mundo podría aumentar 3 grados centígrados este siglo y en otras zonas del planeta podría ser más.

Gracias al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático se sabe lo siguiente:

- Entre 1880 y 2012, la temperatura media mundial aumentó 0.85 grados centígrados. Derivándose en la reducción del 5% de cereales por cada grado aumentado, entre ellos: maíz, trigo y otros cultivos importantes, con una reducción de 40 megatonnes anuales a nivel mundial entre 1981 y 2002 debido a un clima más cálido.
- Los océanos se han calentado, la cantidad de nieve y de hielo ha disminuido, y ha subido el nivel del mar debido a esto entre 1901 y 2010, el nivel medio del mar aumentó 19 cm. La extensión del hielo marino del Ártico se ha reducido en los últimos decenios desde 1979, con una pérdida de hielo de 1.07 millones de km² cada decenio.
- Dada la actual concentración y las continuas emisiones de gases de efecto invernadero, es probable que a finales de siglo, el incremento de la temperatura mundial supere los 1.5 grados centígrados en comparación con el período comprendido entre 1850 y 1900. Los océanos del mundo seguirán calentándose y continuará el deshielo. Se prevé una elevación media del nivel del mar de entre 24 y 30 cm para 2065 y entre 40 y 63 cm para 2100.
- Las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) han aumentado casi un 50% desde 1990.

- Entre 2000 y 2010 se produjo un incremento de las emisiones mayor que en las tres décadas anteriores.
- Si se adopta una amplia gama de medidas tecnológicas y cambios en el comportamiento, aún es posible limitar el aumento de la temperatura media mundial a 2 grados centígrados.

(Naciones Unidas, 2018)

IMPORTANCIA DEL ENFOQUE SUSTENTABLE EN EL DESARROLLO URBANO

Uno de los sectores más grandes para el desarrollo de la economía de cualquier urbe es la industria de la construcción, la cual tiene impactos significantes tanto en el ambiente como en la sociedad, entre ellos la contaminación interior y exterior, generación de gases efecto invernadero, etc. (Zillante *et. al.*, 2017, p.1440). El CO₂, uno de los principales gases del efecto invernadero es generado en mayor parte por las emisiones vehiculares, también por los sectores de ganadería, agricultura, producción de energía eléctrica, consumo energético de edificios y actividad industrial. Estas actividades tienen efectos que afectan directamente su salud, el confort o la experiencia percibida por las personas, ya sea desde el ruido o las temperaturas. De igual modo las edificaciones actuales se ven expuestas a estas condiciones, que pueden impactar en la eficiencia, calidad y vida útil de las mismas. (Paull, *et al.*, 2018, p.448)

Por lo anteriormente mencionado la calidad de vida en las ciudades se ve afectada. Esta problemática se origina particularmente en países desarrollados, donde un significativo número de vegetación se reemplaza por construcciones de concreto, creando superficies con baja reflectividad, que dan lugar a fenómenos como el efecto isla de calor. (Pérez, *et. al.*, 2014, p. 46., Cuce, 2017, p. 249).

El clima extremo es otro problema, el uso de sistemas artificiales de climatización provoca un impacto negativo, ya que el aire acondicionado y la iluminación son a menudo responsables del 33% de las emisiones de dióxido de carbono en países como Israel, una cantidad que se espera crezca a un 50%. En este país, el sector de la construcción mejora los estándares de calidad de vida, sin embargo simultáneamente genera 7 millones de toneladas de desperdicio anualmente. El mismo ha experimentado un rápido desarrollo, estimulando el consumo de energía, agua y otros recursos, mucho de ello gracias a este sector, por ello es necesario disminuir el impacto adverso. (Hadas, *et. al.*, 2014, p.558).

En el pasado inmediato, la urgencia por perseguir un progreso a pesar de los consecuentes problemas mencionados, consiguió que los beneficios que una urbanización sustentable puede traer hayan sido ignorados. (Pérez, *et. al.*, 2014, p. 46, Cuce, 2017, p. 249). Algunos de ellos ofrecen la manera de contrarrestar los efectos que produce la industria de la construcción en el ambiente. Un desarrollo sustentable debe tener una visión integral, en la que deben intervenir tres elementos de igual importancia, que son el medio ambiente, economía y sociedad; que comparten una relación dinámica, por su interdependencia. Puesto que, si se cuenta con un ambiente sano y pleno de recursos naturales puede existir una economía viable y con ella, una sociedad justa. (Sánchez, 2013, p. 7). Buscando los mismos beneficios, se ha desarrollado investigación por distintos países, consiguiendo alternativas que satisfacen estos tres elementos, entre ellas la implementación de muros y azoteas verdes, la construcción con materiales reciclados y la utilización de recursos naturales renovables.

Por lo anteriormente expuesto esta tesis está constituida de la siguiente forma; para dar comienzo al capítulo 1 se incluye un marco histórico que comprende el inicio de los sistemas verdes con la aparición de los jardines colgantes en babilonia, su crecimiento en la edad moderna y contemporánea como el desarrollo de muros y techos verdes en alemania, hasta su llegada a México. Se abordan algunos conceptos como “muro verde” y “azotea verde”, la clasificación de ellos, en la que se contemplan los sistemas populares y otros que emergen en la literatura e investigación contemporánea. Se explican brevemente cada elemento que conforma al sistema de naturación descrito y costos de instalación. Se describen materiales recurrentes que se emplean como sustratos, su clasificación y las características más importantes para su correcta elección, y correcto funcionamiento. De la misma manera, se describe brevemente la clasificación de especies autóctonas en Nezahualcóyotl y las especies vegetales adecuadas para cada sistema de naturación. Para concluir, se describe cuáles son las ventajas y desventajas que caracterizan a los sistemas de naturación a nivel general, y se enuncian algunos criterios de diseño indispensables para la correcta instalación y correcto funcionamiento del sistema.

El capítulo 2 tiene por nombre viviendas ecológicas, en él se define qué es una vivienda ecológica y los puntos que comprende. En seguida, se desarrolla que es una edificación verde, posteriormente se enlistan los criterios, beneficios y elementos de las viviendas ecológicas. En el bloque siguiente se mencionan las certificaciones y normas de orden nacional e internacional dentro del marco de edificaciones verdes y los beneficios que estas certificaciones ofrecen. En el siguiente tema, se agrega una investigación de materiales ecológicos, naturales o reutilizables (bambú, polietileno empleado en la construcción, ecoladrillos, concreto traslucido y foto catalítico, mortero con residuos plásticos y aprovechamiento de aguas residuales). El siguiente apartado habla sobre los

métodos y los componentes de un sistema de captación y aprovechamiento de agua pluvial así como la importancia de su tratamiento. Para finalizar, se incluyen los resultados de investigaciones de algunos autores, que abordan los sistemas de naturación como un mecanismo de tratamiento con el que se puede mejorar la calidad del agua destinada para riego, presentando eficiencias de remoción que varían con cada sustrato probado.

En el capítulo 3, se presenta la metodología de selección para obtener el modelo final del proyecto, describiendo los diseños preliminares del prototipo a escala, se mencionan los materiales empleados y el fundamento para su empleo (PET, Bambú, arena como material de relleno). Se añade una sección mostrando los resultados obtenidos del ensaye de distintos tipos de ladrillos ecológicos y de distintas formas de trabajo (individual, en grupo, vertical y horizontalmente). Se muestran las etapas y tareas en el proceso constructivo de la vivienda ecológica a escala, el proceso constructivo de los sistemas de naturación: azotea verde extensiva, paredes vivientes y fachada verde indirecta). En las secciones siguientes se describen las plantas cultivadas en los sistemas y un resumen de los costos de los materiales empleados en los sistemas verdes. Por último, se anexa un apartado que incluye recomendaciones en el proceso constructivo de la vivienda ecológica escala, el manejo del bambú, fabricación de ecoladrillos y en la instalación de los sistemas de naturación (muros vivos, fachadas y azoteas), además de las conclusiones derivadas del proceso constructivo y de la terminación de la vivienda.

CAPÍTULO I. MUROS Y TECHOS VERDES

Musy, *et al.*, (2017, p.2) en el artículo *“Assessment of direct and indirect impacts of vegetation on building comfort: A comparative study of lawns, green walls and green roofs”* hablan de la factibilidad de usar las tecnologías verdes como una forma de reducir las tensiones térmicas experimentadas por el concreto, aislar las temperaturas extremas y promover la expansión de áreas verdes, en vista de que el efecto de los árboles ha sido ampliamente estudiado y demostrado ser la fuente más eficiente para enfriar ciudades y mejorar el confort térmico a escala local.

MARCO HISTÓRICO

JARDINES COLGANTES DE BABILONIA (SIGLO VI A.C)

Según hechos históricos el concepto de muros y techos verdes tendría su comienzo en el siglo VI A.C. con los jardines colgantes de Babilonia. Estrabón decía que los jardines colgantes constaban de terrazas abovedadas alzadas unas sobre otras, que descansaban sobre pilares cúbicos. Estas eran ahuecadas y rellenas con tierra para permitir la plantación de árboles de gran tamaño. Los pilares, las bóvedas, y las terrazas estaban contruidos con ladrillo cocido y asfalto. En esta época se desconocía los beneficios al medio ambiente, por lo que su uso era ornamental.

EDAD MODERNA Y CONTEMPORANEA (SIGLO XV-XXI)

Acerca de los Antecedentes sobre los Muros Verdes, Manso y Castro (2014, p.864) en su artículo " Green wall systems: A review of their characteristics " mencionan lo siguiente:

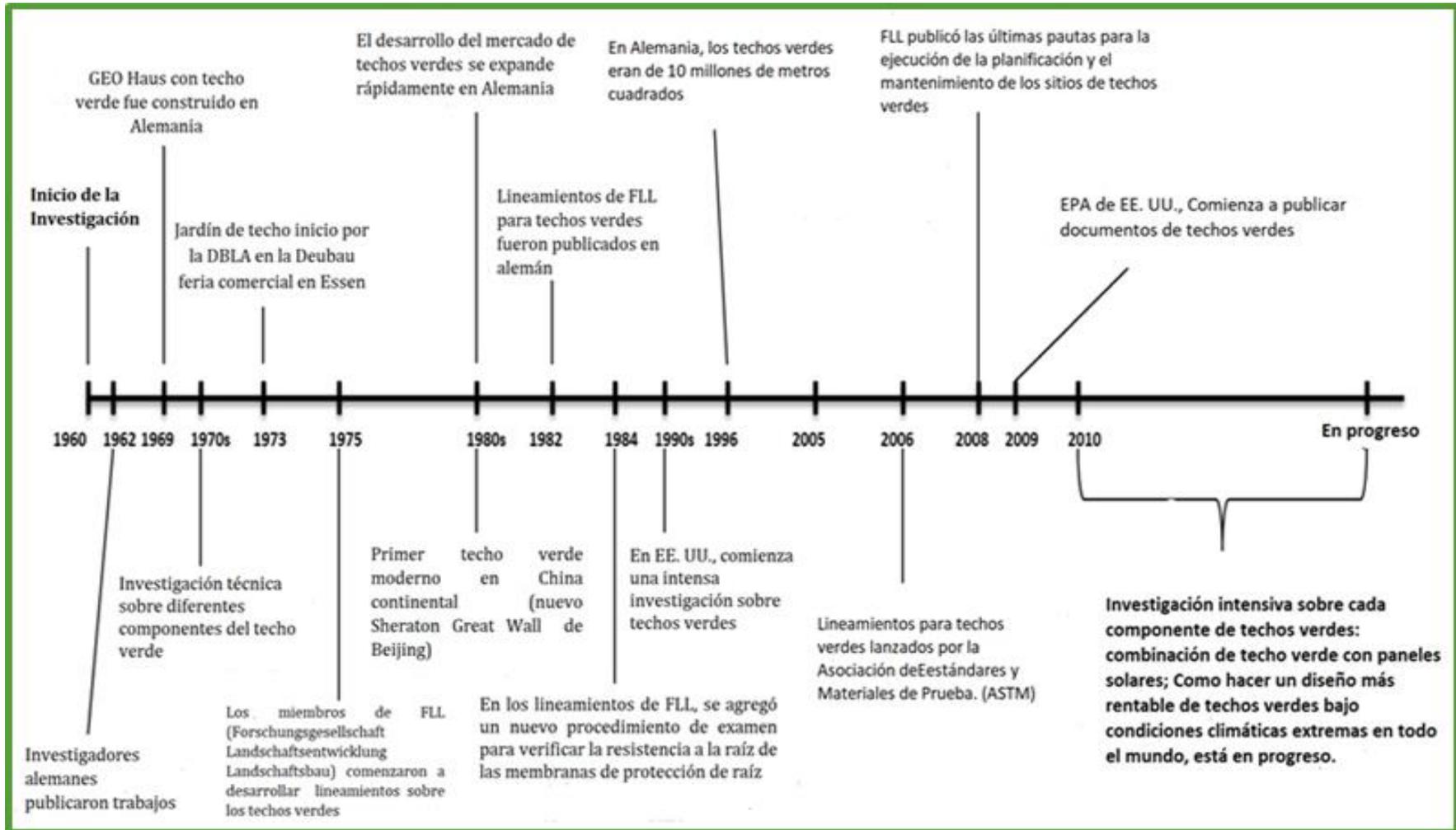
En climas mediterráneos, las vides se usaban comúnmente para cubrir pérgolas, sombreando sobre el edificio, o en paredes del edificio, enfriándolo durante el verano. Desde los siglos XVII y XVIII, sobre todo en el Reino Unido y Europa Central, el uso de plantas trepadoras para cubrir las paredes del edificio proliferó. En el siglo XIX, los escaladores leñosos se usaban comúnmente como elementos ornamentales de envolvente de edificios en ciudades europeas y norteamericanas. Las primeras investigaciones sobre muros verdes se basaron en aspectos botánicos. Sin embargo, desde la década de 1980 se dio una nueva idea de las fachadas verdes como contribuyentes a la mejora de las ciudades ecológicas. El movimiento de la ciudad jardín desde finales del siglo XIX marcó la integración de la ecología en la planificación urbana. El movimiento Jugendstil alemán (Art Nouveau) de principios del siglo XX animó la integración de la casa con el jardín. Durante este período surgieron algunos programas de incentivos para la instalación de muros verdes. De hecho, Berlín es un ejemplo importante, de 1983 a 1997, donde se instalaron cerca de 245.584 metros cuadrados de muros verdes.

DESARROLLO DE MUROS Y TECHOS VERDES EN ALEMANIA (1960)

Con respecto al tema de Techos verdes, Muhammad, *et al.* (2018, p. 759) comparten lo siguiente:

Los techos verdes modernos comenzaron en Alemania a principios de la década de 1960, cuando surgieron crisis energéticas. Los alemanes comenzaron a construir techos verdes para reducir el consumo de energía en los edificios. En los techos verdes modernos, Alemania es conocida como el líder mundial de techos verdes, porque los techos verdes a

Figura 1.2. Historia de las azoteas verdes. Muhammad S., et. al. (2018)



gran escala se estaban desarrollando, diseñando e implementando. La Fig. 1.2 explica la historia de los techos verdes.

LLEGADA A MÉXICO

En México “El inicio de la instalación de este tipo de infraestructura fue en el año de 1999 en el Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (fig. 1.3), por medio de un convenio con la Comisión de Recursos Naturales del Gobierno de la Ciudad de México (CORENA).” (Sanchez, 2012, p.14)



Figura 1.3. Azotea verde Instituto de Biología de la UNAM. Fundación UNAM. 2016.

MURO VERDE

DEFINICION

Un muro verde es un sistema que cuenta con materiales y tecnología para cubrir de vegetación superficies de un inmueble que quedan a la intemperie en una forma sofisticada y ordenada. Uno de los primeros sistemas de vegetación de este tipo conocido como *Pared Viviente* o en inglés *Living Wall Sistem (LWS)* puede estar constituido por una estructura de acero, un panel aislante, así como el medio de soporte que contendrá al sustrato y la especie a emplear, aspersores y en ocasiones elementos adicionales. Tales sistemas son empleados con el objeto de proteger a la edificación de los efectos de la intemperie y por sus beneficios: mejora de la estética del edificio, reduce los efectos de inundación, aminora la contaminación atmosférica así como el consumo energético, agrega aislamiento acústico (sonido). Incluso aumenta la valuación del mismo, entre otros.

CLASIFICACIÓN

Hoy en día, los muros verdes pueden ser clasificados principalmente según su funcionamiento, el cual, obedece al número de elementos que lo conforman, la variedad de especies que pueden emplearse, la instalación directa o con paneles de separación, etc., de tal modo que estas variantes permiten la distinción entre un sistema u otro. Cabe mencionar que actualmente se desarrollan cientos de pruebas y experimentos que implementan nuevos aditamentos, mecanismos o formas distintas de operación en los muros verdes y de las cuales se derivan nuevas clasificaciones, que actualmente son de menor reconocimiento pero igualmente importantes, algunas de ellas se muestran en la figura 1.4.

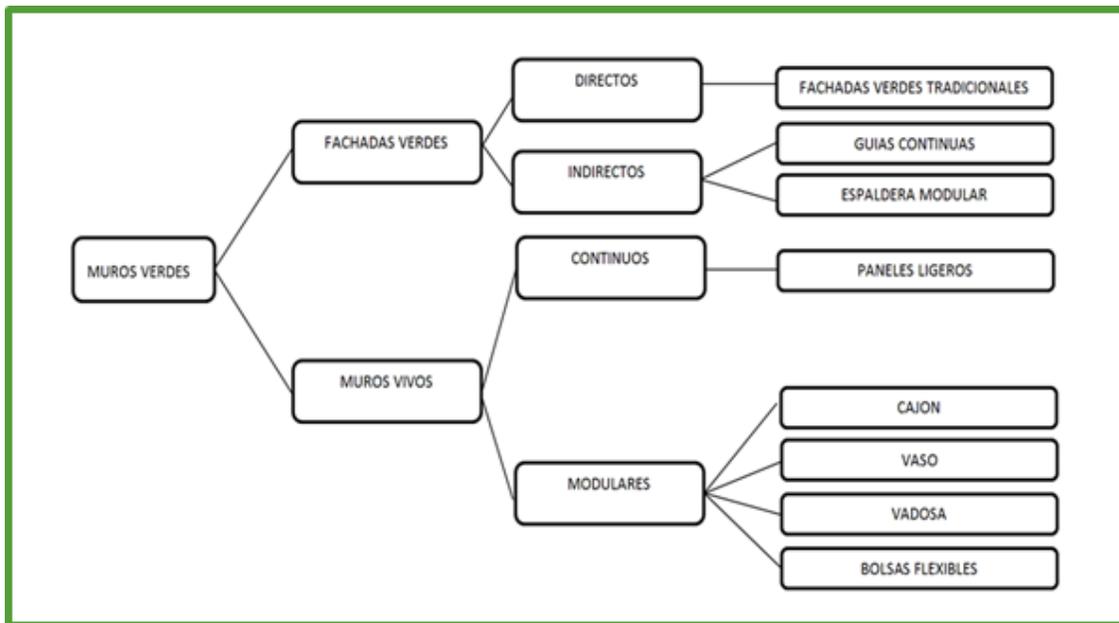


Figura 1.4 Clasificación de muros verdes de acuerdo a sus características de construcción.
Modificada de Manso y Castro, 2014.

FACHADAS VERDES (Green Facades).

De acuerdo a autores como Manso M., Castro-Gomes J. (2016) y Erdee (2016) las fachadas verdes se pueden clasificar como *directas* e *indirectas* (fig 1.5). Las fachadas verdes directas se basan en el uso de especies escaladoras de hoja *perenne* o *caducifolia*, unidas directamente a la superficie del edificio que se puede ver en la arquitectura tradicional.

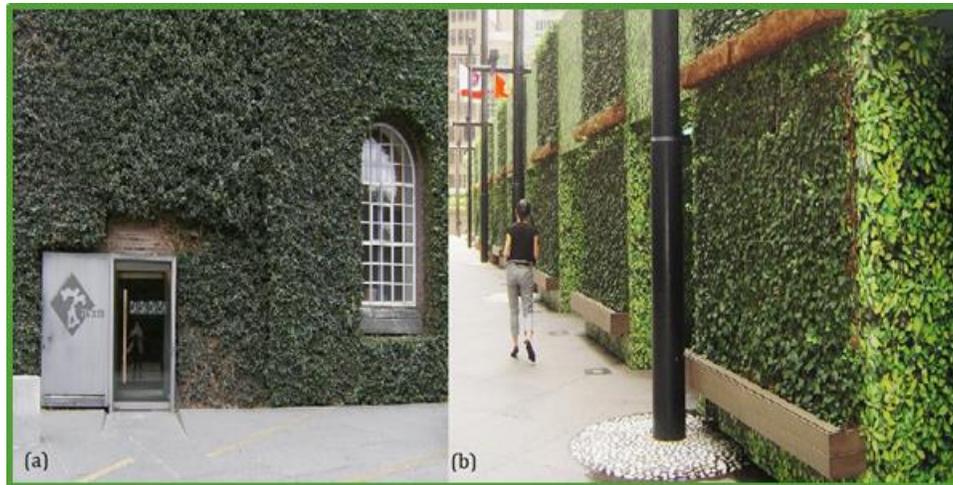


Figura 1.5. Clasificación de fachadas verdes: (a) fachada verde directo, casa particular, Golegã, Portugal., (b) fachada verde indirecta. Fuente : Manso y Castro ,2016.

Las fachadas verdes *indirectas* o fachadas verdes de doble faz incluyen una estructura de soporte vertical para el desarrollo de plantas trepadoras que es soportada por enrejados o cables de acero (figura 1.6) gracias a esta variación los sistemas indirectos resultan mejores en el aislamiento pues, al estar soportados en una estructura, crean un espacio de aire, entre el follaje y las paredes externas. De esta manera, las plantas son guiadas para desarrollarse a lo largo de la estructura de soporte. Sin embargo, varios investigadores de la literatura señalan que los sistemas directos de muros verdes son más rentables en comparación con los indirectos, ya que se omite el empleo de estructuras de soporte. (Manso y Castro, 2016, p.1; Cuce, 2016, p. 248)



Figura 1.6. Estructura reticular y colocación de plantas escaladoras. Sin autor, 2018

PAREDES VIVIENTES (LIVING WALLS)

Los muros vivos incluyen materiales y la tecnología para soportar una variedad más amplia de plantas, creando un crecimiento uniforme a lo largo del muro. Por otro lado, los muros vivos se clasifican como *continuos* o *modulares*, los continuos se basan en la aplicación de peso ligero y pantallas permeables en donde cada planta es insertada individualmente (figura 1.7) los modulares son elementos con dimensiones específicas que incluyen el medio de cultivo donde las plantas pueden crecer. Cada elemento es soportado por una estructura complementaria o bien son fijados directamente en la superficie vertical. (Manso y Castro, 2016, p.1)



Figura 1.7. Ejemplo de living wall. Fuente: Edu castillo, 2014.

Los sistemas de paredes vivas requieren cajas de macetas mucho más complejas y sistemas de soporte (fig. 1.8) como estructuras prefabricadas para facilitar el crecimiento de las plantas que requieren una nutrición específica en crecimiento mientras se unen a las paredes. La aplicación de los paneles modulares es un tipo de enverdecimiento vertical, en el cual las plantas pueden obtener suficientes nutrientes para sobrevivir con la ayuda de los paneles. (Cuce, 2016, p. 248)



Figura 1.8. Clasificación de paredes vivas continuas y modulares. A) Pared viviente continua con pantalla permeable. Alibaba, 2018. B). Diferentes tipos de módulos. Decorideas, 2015

MURO VERDE ACTIVO O PASIVO

Desde otra perspectiva existe otra variación de un sistema de muro verde como lo explica Paull, *et. al.*, (2018) La biofiltración botánica activa, es una tecnología emergente, que muestra la promesa de superar las limitaciones de capacidad volumétrica de los biofiltros pasivos; con la diferencia clave de que los sistemas activos contienen un dispositivo adicional para suministrar aire directamente al módulo, que los sistemas pasivos carecen. Los sistemas de muros verdes activos utilizan algún tipo de dispositivo mecánico para forzar a que grandes volúmenes de aire contaminado pasen a través del sustrato, la zona de la raíz y el follaje. Al igual que los sistemas pasivos, los biofiltros botánicos activos utilizan la actividad microbiana dentro de la biofiltración y el medio de crecimiento vegetal para biodegradar compuestos orgánicos volátiles. (Paull, *et. al.*, 2018, p. 449)

ELEMENTOS DEL SISTEMA

Según Manso y Castro (2014) estas son las partes que componen un sistema de muro verde ordinario:

- **Soporte:**

Dependiendo del tipo de muro verde que se instale es como se determinará el soporte que ayudará a contener la vegetación:

Las fachadas verdes tradicionales o directas generalmente no tienen estructura de soporte. Confían en la capacidad de las plantas trepadoras para adherirse a la superficie vertical.

Las fachadas verdes indirectas mediante la aplicación de una estructura de soporte crean un espacio de aire entre la superficie del edificio y la vegetación y evita que la vegetación se caiga. La mayoría de estas estructuras incluyen guías continuas o modulares, como cables, enrejado de alambre de acero galvanizado o inoxidable. Las estructuras de acero y cables de tracción se pueden utilizar para sostener plantas trepadoras con follaje más denso y para soportar su peso. Las redes de alambre tienen espacios más pequeños y se pueden usar para el soporte de plantas de crecimiento lento.

Algunos sistemas de fachadas verdes indirectas, sobre todo enrejados modulares, incluyen macetas llenas de sustrato y estructuras de soporte individuales, lo que permite la suspensión de los elementos a lo largo a varias alturas.

Las paredes vivas generalmente se basan en la instalación de un marco fijo a la pared, formando un espacio vacío entre el sistema y la superficie. Este marco sostiene el panel base y protege la pared de la humedad. Está cubierto con capas de pantallas permeables, flexibles y resistentes a las raíces, pegadas a la base. La capa externa de la pantalla se corta para formar bolsillos para la introducción de plantas individualmente. Las paredes vivas modulares pueden tomar varias formas (por ejemplo, bandejas, recipientes, baldosas de macetas o bolsas flexibles) que requieren una estructura diferente.

- **Capa de drenaje:**

El exceso de drenaje de líquido en las paredes verdes se produce por gravedad. Las paredes vivas continuas y modulares utilizan geotextiles que fomentan el drenaje a lo largo de la membrana permeable y previenen la proliferación de las raíces. Las bandejas modulares aprovechan la superposición de módulos y materiales para mejorar el drenaje y la reutilización del exceso de agua a los módulos siguientes. Para un mejor drenaje, el fondo de un sistema modular puede ser cóncavo, inclinado, perforado o estar hecho de un material poroso o absorbente. Algunos ejemplos de sistemas modulares también mencionan la inclusión de orificios de ranuras en los lados y la cara posterior de los módulos, para una mejor aireación y eliminación del exceso de humedad contenido en el sustrato.

- **Medio de cultivo:**

El medio de cultivo dependerá de la clasificación del muro verde:

En el contexto de las fachadas verdes, solo los sistemas modulares requieren la selección de un medio de cultivo, que debe ser liviano, ya que cada elemento se suspenderá y se adaptará a las especies de plantas seleccionadas y las condiciones ambientales.

En el campo de las paredes vivas continuas tampoco tienen sustrato. Como se mencionó anteriormente, estos sistemas utilizan pantallas absorbentes livianas donde las plantas se insertan en los bolsillos, este tipo de sistemas se basan comúnmente en un método hidropónico, que requiere un suministro permanente de agua y nutrientes debido a la falta de sustrato. Los sistemas hidropónicos permiten el crecimiento de plantas sin suelo, utilizando pantallas constantemente húmedas por el sistema de riego. La falta de suelo se compensa proporcionando los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas a través del agua de riego.

Las paredes vivas modulares comúnmente se llenan con un medio de crecimiento hecho de compuestos orgánicos que puede incluir una capa de sustrato inorgánico. Los materiales generalmente usados en esta capa son granulares, expandidos o porosos, ya que estos materiales se caracterizan por proveer una buena retención del agua y reducir el peso, a menudo se emplea espuma agrícola para aligerar. El sustrato puede mejorarse con nutrientes para el crecimiento de las plantas (por ejemplo, mezcla de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, quelatos de metales, minerales, nutrientes y hormonas para plantas u otros aditivos).

- **Vegetación:**

La vegetación apropiada depende de las condiciones climáticas (grado de temperatura, viento, frecuencia de la precipitación, nevadas o factores de intemperismo extremos), las características del edificio (orientación y tiempo de exposición con el sol, integración o no de sistemas de captación de agua) y las condiciones de la pared preexistente sobre cuya pared verde estarán insertada. Los sistemas de paredes vivas permiten el desarrollo de conceptos estéticos basados en las creaciones artísticas con especies de plantas, explorando el uso de patrones, variaciones en color, textura, formas y volumen del follaje, vitalidad y crecimiento. Estas soluciones trajeron una variedad más amplia de especies a las paredes verdes, permitiendo la integración de arbustos, pastos y varias plantas perennes siempre que se tengan en cuenta sus necesidades de riego y nutrientes.

Los sistemas hidropónicos hacen posible el crecimiento de una mayor variedad de plantas, en diferentes estados de desarrollo: plantas cultivadas, esquejes o semillas. En estos casos, la vegetación es seleccionada de acuerdo con el efecto estético deseado.

- **Irrigación:**

El suministro de agua de las paredes vivas se realiza mediante la instalación de un tubo de riego continuo ubicado en la parte superior. Los muros vivos continuos tienen un sistema de irrigación instalado en la parte superior de la estructura conectada al sistema central de riego. En el caso anterior, la malla permeable permite la distribución de agua y nutrientes a lo largo de la superficie. Algunas paredes vivas modulares en forma de bandejas incluyen un rebaje en la parte superior del módulo para insertar el tubo de riego. Los orificios de drenaje ubicados en el fondo de la bandeja se utilizan para permitir que el exceso de agua irrigue los módulos que se encuentran debajo.

COSTOS DEL SISTEMA

IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

Los modelos de evaluación de las implicaciones económicas de la edificación verde (muros y azotes verdes) a través del análisis costo-beneficio tienden a ser en función de las particularidades de la economía de cada país, procesos de producción, industria de la construcción y legislación. La importancia de cuantificar tanto los costos actuales como los beneficios de las edificaciones verdes, radica en que se puede obtener información para la toma de decisiones. Las empresas privadas necesitan conocer si la construcción verde involucra los costos adicionales y si es que sí, cual es el periodo de amortización (tiempo para recuperar la inversión). Además, el público necesita conocer de los beneficios económicos de las edificaciones verdes en la economía nacional, así como también para sus usuarios. Por otra parte, algunas acciones que resultan de gran impacto son que el gobierno debe de saber si la legislación presente o prevista, las normas y los estatutos son razonables, y si se debería centrarse en proporcionar más incentivos para promover mayormente la práctica de la construcción verde, o combinar aquellos incentivos con sanciones punitivas también (Hadas, *et. al.* 2014).

COTIZACIONES DE INSTALACIÓN EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL

En un estudio dirigido por Rosasco & Perini en 2018, se evaluó con un análisis costo beneficio un sistema de naturación vertical como fachada de un edificio de oficinas y negocios establecido en Génova, Italia. Este cuenta con características tales como una extensión de cubierta vegetal en una superficie de 120 m² con diferentes especies de

vegetación, que incluyeron plantas trepadoras, arbustos, especies de hoja perenne (*Rhinosperma jasminoide*, *Hedera helix*, *Phlomis fruticose* y *Cistus Jessami*), también se instalaron paneles hechos con geotextil y un sistema de irrigación con la capacidad para cubrir 2.51 m²/día. En este estudio se tomaron en cuenta 2 escenarios, en el primer escenario se contempla un período de vida útil de 25 años, considerando que en este plazo es conveniente realizar el mantenimiento y un segundo escenario que contempla un período de vida útil de hasta 50 años. Los resultados del estudio mostraron las siguientes observaciones:

- Los costos de instalación suman un total de \$715,819 pesos en una extensión de 120 m² y comprenden la colocación de paneles, sistema de soporte, plantas, incluyendo el costo de transporte de los materiales. \$ 4,618.12 pesos.
- El mantenimiento de la construcción tiene un costo total de \$412,138.5. Este incluye una poda dos veces al año realizada dentro de las 8 h mediante una plataforma que se eleva. Además, se supone una frecuencia de reemplazo de especies de plantas muertas del 3% / año; Para el primer año después de la instalación, se considera una sustitución del 10%. Los costos incluyen también la sustitución de las tuberías de agua del sistema de riego. Dentro de la vida útil, los costos de mantenimiento anuales (desde el segundo año hasta el final de la vida útil) se implementan por la tasa de inflación (1.6%).
- La poda de la vegetación tiene un costo de \$22,233.79 pesos/año
- El remplazo de plantas y tubería tiene un costo de \$19,630 pesos/año
- El costo de irrigación \$3,058.5/año.

A continuación puede mostrarse el resumen de costos en la siguiente tabla:

TABLA 1.1 COSTOS DE UN MURO VERDE EN UN EDIFICIO

CATEGORIA	COSTO TOTAL (\$)	COSTO UNITARIO (\$/m2)	TOTALES (\$/año)
INSTALACION DE PANELES, SISTEMA DE SOPORTE, PLANTAS, TRANSPORTE DE MATERIALES.	715,819.50	4,618.12	6868975000
MANTENIMIENTO AL AÑO: PODA, REPOSICION DE VEGETACIÓN MUERTA, REPLAZO DE TUBERIA PARA IRRIGACIÓN.	412,138.50	2,658.94	2.46596E+12
PODA	360		22,233.79
REPLAZO DE VEGETACIÓN Y TUBERÍAS	200000	Total de intereses pagados	19630.81
IRRIGACIÓN	43679	Importe del impuesto de propiedad mensual	3058.5
DISPOSICIÓN DE DESECHOS: INCLUYE LA ELIMINACIÓN DEL SISTEMA DE SOPORTE, PANELES, PLANTAS E IMPUESTOS POR TRANSPORTE Y VOLQUE DE DESECHOS	360		22233.79
EN 25 AÑOS	448,515.15	2,893.65	19630.81
EN 50 AÑOS	667,013.63	4,303.38	3058.5

TECHO VERDE

DEFINICIÓN

Un techo verde es un sistema de naturación conformado por una serie de capas y materiales, entre ellos impermeabilizantes tales como geotextiles y geodrenes, que protegen la losa de la humedad y fracturas causadas por raíces, cuenta con un sistema de riego, una capa de sustrato y una capa superior de vegetación que cubren la superficie del techo de una edificación, esto permite mejorar tanto la apariencia como la climatización dentro de la misma. Su función principal es ayudar a aminorar los efectos de los climas extremos y de la contaminación ambiental.

CLASIFICACIÓN

Hay tres grupos principales de sistemas de azotea: Sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos. Estos son generalmente diferenciados por la profundidad del medio de siembra o sustrato, la variedad de plantas y la cantidad de mantenimiento requerida. (Labuschagne y Zulch, 2016, p.711).

Según los autores Muhammad S., *et al.* (2018), Labuschagne y Zulch (2016), Korola y Shushunova (2016), Morakinyo *et al.* (2017) y Vijayaraghavan y Raja (2014). Los techos verdes pueden se clasifican de la siguiente manera:

EXTENSIVA

Tiene un medio de cultivo de 5-15 cm de profundidad, la vegetación se compone de sedums, musgo y perennes (Ver fig. 1.9). Este tipo de techos se subclasifica en, de un solo curso y multi-cursos. Los techos extensos de un solo curso tiene un sustrato con profundidad de 5-10 cm en la mayor parte d la capa de vegetación se utiliza *Sedum* y, por lo general, no requiere riego. El techo extensivo multi-curso tiene un espesor de sustrato de 10 a 15 cm. Este tipo de techo es generalmente liviano y mayormente se usa en los Estados Unidos. De los cuatro tipos, los techos extensos de una o varias pistas son más comunes en todo el mundo debido a su peso ligero, no requieren riego, se requiere menor capital y los costos por mantenimiento son menores.



Figura 1.9. Techo verde extensivo. Sealeco.

SEMI-INTENSIVA

Tiene un medio de cultivo de 15-25 cm de profundidad, se compone de vegetación como arbustos, césped y plantas perennes. Esta clase de techos requiere de un mantenimiento regular (riego, sustitución de planta, provision de nutrientes y poda), si se desea mejorar el rendimiento deberá invertirse más capital. Un ejemplo de este tipo puede mostrarse enseguida en la Figura 1.10.



Figura 1.10. Techo verde semi- intensivo Fuente: Ecojardinunam

INTENSIVA

Tiene un medio de cultivo de 25-60 cm de profundidad, se compone de vegetación como arbustos, césped y árboles. (Ver fig. 1.11). Por el tipo de plantas se requiere de una profundidad mayor de sustrato, por lo que esta clase de techos tiene una alta capacidad de retención de agua, a su vez se necesita más capital y mayor. El diseño de un techo intensivo debe tener mayor cuidado respecto a la capacidad de la estructura del edificio para soportarlo. (Muhammad S., *et al.*, 2018, p. 758; Labuschagne y Zulch, 2016, p.711; Korola y Shushunova N.,2016, p.1822; Morakinyo *et al*, 2017, p.2; Vijayaraghavan y Raja, 2014, p.94-95)



Figura 1.11. Azotea verde intensiva, Vancouver Librería pública. Fuente: Terri Meyer Boake B.E.S. B.Arch. M.Arch., Université de Waterloo, 2013.

TECHOS VERDES MODULARES

Además de la clasificación anterior, las azoteas verdes se pueden dividir en dos tipos: continuas y modulares. Las continuas son las que ya se mencionaron, el techo verde modular es descrito en “ *Benefits of a modular green roof technology*” Korola y Shushunova (2016) de la siguiente manera:

Es el sistema que cubre el techo con la vegetación, incluyendo una serie de módulos: bandejas, cajas, contenedores, bloques y similares, mismos que en ocasiones cuentan con

medidas estandarizadas (ver fig. 1.12). Estos elementos proporcionan el soporte de la estructura para el medio de crecimiento y las plantas que se colocarán en una azotea y se pueden organizar en forma de cuadrícula. Los módulos de techo verde son un producto ecológico de techo portátil autónomo que funciona como adoquines de techo para el lastre de los sistemas de techado de una sola capa.

Esta tecnología funciona en condiciones de áreas urbanas de alta densidad, dado que los sistemas de techos verdes modulares son instalados rápidamente y tienen un buen potencial para resolver problemas tales como la falta de espacio urbano, además de formar sistemas vivos en los techos de los edificios verdes. (Korola y Shushunova, 2016, p. 1821)



Figura 1.12. Proceso de Instalación de un techo verde modular. Fuente: Korol y Shushunova (2016)

Como se muestra en la fig. 1.13 los techos verdes se componen de las siguientes capas:



Figura 1.13. Esquema de diferentes componentes de techo verde. Modificado de Vijayaraghavan K. (2015)

- **Membrana impermeabilizante.**

La membrana impermeabilizante es necesaria para el techo verde con el fin de evitar infiltraciones de agua sobre el techo de concreto, debidas a la tierra húmeda. Estas pueden ser láminas de betún modificado, membranas de aplicación líquida, sistemas de cemento de polímero, membranas de lámina de una sola capa y membranas termoplásticas según lo incluye en su artículo " *Study on green roof application in Hong Kong*" Townshend (2007). Muhammad, *et al.* (2018 p. 763) explican que:

"Se debe tener cuidado al aplicar la membrana de impermeabilización y también debe protegerse de daños físicos y químicos. La selección de la capa de impermeabilización óptima mejora la vida útil de los techos verdes".

- **Barrera Anti raíces.**

La barrera de raíz es obligatoria para techos verdes intensivos, mientras que es opcional para el tipo extenso. El propósito de esta capa es proteger de posibles daños a la estructura

del techo provocados por las raíces de las plantas al penetrar desde las capas superiores. (Bianchini y Hewag, 2012)

- **Capa de drenaje.**

Se trata de una membrana geodren que sirve para dirigir el agua hacia las canaletas o al mecanismo de drenaje del techo.

Esta capa es crucial para el éxito de cualquier techo verde. Proporciona un equilibrio entre aire y agua en el sistema, considerando que la mayoría de la vegetación del techo verde requiere un sustrato aireado para un buen crecimiento, ya que ayuda a eliminar el exceso de agua del sustrato. (Vijayaraghavan, 2015, p. 747). , la capa de drenaje protege la membrana a prueba de agua y mejora las propiedades térmicas del techo verde. (Townshend ,2007; Pérez, *et. al.*, 2012)

Como lo explica Vijayaraghavan (2015, p. 747) estos son los dos tipos principales de capas de drenaje:

- a) Paneles modulares de drenaje hechos de (polietileno o poliestireno) con orificios para almacenar más agua durante el proceso de drenaje (Fig. 1.14)
- b) Materiales granulares de drenaje que tienen espacios de poro grandes para almacenar más agua, es decir, agregados de arcilla expandida de peso liviano (LECA), pizarra expandida, ladrillo triturado, grava gruesa y virutas de piedra (Fig. 1.15)



Figura 1.14. Geodren. Anónimo (n.d.)



Figura 1.15. Floradrain. GALABAU PRAXIS (n.d.)

- **Capa Filtrante**

Se utiliza una capa de filtro de techos verdes para separar el medio de crecimiento de la capa de drenaje y evitar que partículas más pequeñas como finos del suelo y restos de plantas entren y obstruyan la capa de drenaje. También se le llama geotextil, este tipo de capas se emplean con el objetivo principal de proporcionar un mejor flujo de agua en la capa de drenaje. (Vijayaraghavan y Raja, 2015, p.70-71). Aunque no es su función principal, pues también actúa como una membrana anti raíces para las plantas. Además, también aumentan la capacidad de retención de agua hasta casi 1.5 L de agua por m² (Wong y Jim, 2014).

Medio de cultivo.

Su función es proveer el soporte o medio de anclaje para la vegetación, proporcionar rigidez a las plantas y los nutrientes para su crecimiento. Algunos materiales empleados como sustrato en su estructura contienen compuestos orgánicos, los cuales proveen nutrientes que se necesitan para el crecimiento de la vegetación.

- **Vegetación.**

La parte vital e interesante del desarrollo del techo verde es la selección de la capa vegetal, que maximiza la vida de los sistemas de naturación. El éxito de los techos verdes depende de la salud de la planta. En la selección de esta, se debe considerar la ubicación geográfica, la intensidad de la lluvia, la humedad, la exposición al viento y al sol. La profundidad de los medios de crecimiento también puede determinar las especies de plantas que se pueden

usar para los techos verdes. Muchos autores trabajaron en el descubrimiento de especies de plantas en función de la profundidad del suelo (Muhammad, et. al., 2018, p. 761).

COSTOS DEL SISTEMA

Una variable importante en la sustentabilidad es la factibilidad en términos del costo. La fig. 1.16. Muestra una investigación del costo de un techo verde, desglosando el porcentaje que ocupan cada una de sus capas del total del capital.

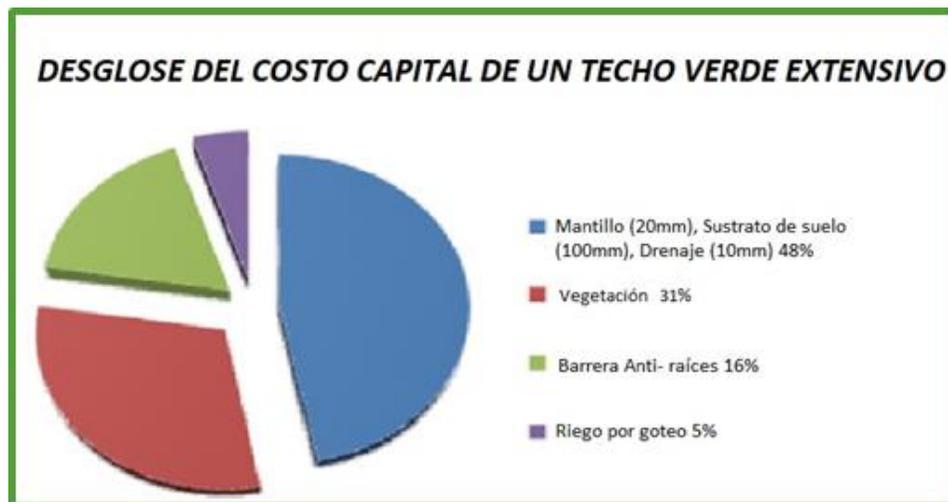


Figura 1.16. Muestra del desglose general del costo de capital del techo verde extensivo. Modificado de Townshend. (2007)

Como lo analizan Muhammad, et. al. (2018):

El costo de los techos verdes es el mayor desafío para su aplicación. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar techos verdes rentables que puedan tener múltiples beneficios en el área urbana. Como se ve en la fig. 1.10, el costo mayoritario es el que demanda la inversión en el sustrato y la capa de drenaje debido a la importancia que tienen dentro del funcionamiento del techo verde, dado que uno permite el crecimiento adecuado de las plantas y el otro protege la losa del techo de daños estructurales provocados por el agua, por estas razones requiere el empleo de materiales de calidad, por otro lado, las especies o plantas también ocupan un porcentaje alto dentro del capital total por ser el elemento principal en el funcionamiento y volumen del techo verde. Lo ideal es que la suma de los costos por instalación, operación y mantenimiento al final del periodo de vida útil resulte en un costo asequible. (p. 763-764)

SUSTRATO

El sustrato influye directamente en el crecimiento de la planta y el rendimiento de los techos verdes. Por lo tanto, elegir uno adecuado es crucial para el éxito de cualquier tejado verde. No es práctico esperar que un solo tipo de material tenga todas las características necesarias para constituirlo. (Vijayaraghavan, 2015, p.745 ; Muhammad, *et. al.*, 2018, p. 762)

CLASIFICACIÓN

Los sustratos pueden catalogarse en función de su tiempo de retención en 2 tipos:

Rápidos: Con conductividad hidráulica alta o veloz y el tiempo de retención del agua es corto, esto depende en gran medida de las características de la estructura química del sustrato.

Lentos: Es aquel que tiene una conductividad hidráulica limitada y un tiempo de retención mayor.

SUSTRATOS EMPLEADOS EN MUROS Y TECHOS VERDES

El desempeño de los sistemas de naturación mejora cuando el sustrato empleado contiene composta, entre mejor calidad tenga esta mejores serán los beneficios, o de cierto tipo de rocas debido a su alto contenido mineral (Medl, *et. al.*, 2017). Por si fuera poco, en un experimento realizado se analizó una pared naturada en julio del 2015 con una cubierta vegetal del 30% y otra en julio del 2016 con un 100% de cubierta vegetal, donde los resultados obtenidos mostraron que el sustrato es responsable predominantemente de la disminución de las fluctuaciones de temperatura, aun más que la cubierta vegetal misma, logrando hasta un 50% de disminución en las fluctuaciones de temperatura.

Por otro lado, los medios de crecimiento del techo verde deben tener una porosidad con alto contenido de aire (AFP) porque ayuda al flujo de agua de forma continua bajo eventos de lluvia y evita la filtración de un techo verde. Un sustrato óptimo debe ser estable y soportar amplios rangos de plantas / vegetación. (Muhammad, *et. al.*, 2018, p. 763)

Según Vijayaraghavan (2016, p. 745-747) un medio de crecimiento ideal debe tener las siguientes propiedades:

- Alta estabilidad en diferentes condiciones
- Disponible localmente y compatible con una gran variedad de plantas
- Económico
- Debe tener un contenido orgánico mínimo

- Debe tener una gran capacidad de retención de agua
- Peso ligero
- Alta conductividad hidráulica
- Menos lixiviación y alta capacidad de absorción
- Buena aireación
- Contribuir a mejorar la calidad del agua

Es una practica general mezclar varios componentes de diferentes características a proporciones definidas. Se pueden incluir diferentes materiales como la piedra pómez, zeolita, escoria, vermiculita, perlita, turba, ladrillo triturado, arena, lana de roca, fibra de coco y otros materiales de desecho de bajo costo. Para el sustrato de techo verde, se recomienda utilizar el material de desecho local que puede hacer que tenga un precio competitivo. (Vijayaraghavan y Raja, 2014, p.94; Prodanovic, *et. al.*, 2017; Muhammad, *et. al.*, 2018 p.762; Vijayaraghavan, 2015,p.744)

En la tabla 1.2 se muestran características del medio de cultivo de los muros y techos verdes que han sido investigados por Vijayaraghavan y Raja F. (2014)

Parámetros		Vermiculita	Perlita	Ladrillo triturado	Arena	Turba de coco
Tamaño de partícula	(mm)	0.5-2.0	0.25-1.0	4.0-10.0	0.25-1.0	0.5-1.0
Densidad aparente seca	(kg/m ³)	279	148	823	1608	115
Densidad aparente (en la retención máxima de agua)	(kg/m ³)	978	576	1080	2040	597
Capacidad de retención de agua	(%)	62.5	27.5	20.3	30.5	46.3
Porosidad llena de aire	(%)	5.8	31.1	28.3	10.3	10.7
Conductivada hidráulica	(mm/h)	2170	580	14200	3850	3280
pH		9.3	8.3	9.5	8.1	7.1
Conductividad	(μS/cm)	155.2	17.9	61.7	10.6	128
Sólidos disueltos totales	(mg/L)	99.3	11.5	39.5	6.8	81.9
Na	(mg/L)	6.1	5.7	7.3	4.2	20.4
K	(mg/L)	1.3	0.51	1	0.37	51.1
Capacidad de retención de agua	(mg/L)	3.7	0.4	3.8	0.93	0.76
Mg	(mg/L)	1.9	0.08	0.7	0.29	0.29
Al	(mg/L)	3	0.08	0.01	0.93	0.28
Fe	(mg/L)	2.8	0.01	0.06	0.72	0.36
Cu	(mg/L)	0.07	0.01	0.02	0.02	0.24
Zn	(mg/L)	0.03	0.02	0.02	0.03	0.35

Tabla 1.2. Características de diferentes componentes de sustrato y sustrato de techo verde (mix-12). Modificado de Vijayaraghavan y Raja. (2014)

Un criterio indispensable para hacer la elección del sustrato es la capacidad de carga del medio de soporte del sistema de naturación, como lo citan Muhammad, *et. al.* (2018 p. 762) los medios de crecimiento de techos verdes deben tener una baja densidad aparente, de no ser así puede colapsar la estructura especialmente en edificios viejos. Esto se puede lograr agregando material orgánico de menor densidad en el sustrato, así como usar un 80% de los materiales inorgánicos.

VEGETACIÓN EMPLEADA EN SISTEMAS DE NATURACIÓN

La vegetación es la parte sustancial de los muros y techos verdes gracias a la remediación de la calidad de agua por escorrentía, reducción de la contaminación ambiental, de ruido y de olas de calor en la ciudad. Sin embargo, en algunos casos se deben considerar las limitantes que pueden llegar a tener como el requerimiento y las cargas extras a la estructura provocadas por la profundidad del sustrato más el peso del agua. (Muhammad, *et. al.*, 2018, p. 762; Vijayaraghavan, 2015, p.744; Cuce, 2016, p. 448)

Una elección adecuada de las especies de plantas puede proporcionar características como:

- Capacidad para resistir la sequía y las condiciones climáticas extremas
- Facilidad de disposición y rentabilidad
- Irrigación regular
- Raíces cortas y suaves
- Tener la habilidad de sobrevivir bajo condiciones mínimas de nutrientes
- Menos mantenimiento
- Más evapotranspiración
- Rápida expansión

(Muhammad, *et. al.*, 2018, p. 762; Vijayaraghavan, 2015, p.744)

CLASIFICACION

La variedad de plantas se clasifica por especies, mismas que pueden emplearse según su capacidad de adaptación a las condiciones del medio y según sea el sistema de vegetación implementado.

ESPECIES AUTOCTÓNAS

Estas especies son un tipo de vegetación caracterizadas por crecer y formar parte del ecosistema local, por esta razón se les denomina como nativas, endémicas o autóctonas. En la tabla 1.3 se describen algunas especies autóctonas de la zona de Nezahualcóyotl.

Especie	Descripción	Imagen
<i>Echeveria sp "Conchita"</i>	"Descripción: Herbácea perenne, nativa de México, en forma de roseta, hojas carnosas o suculentas, produce una vara floral colgante con pequeñas flores rosas (ver figura) Vive 7 años." (Secretaría del medio ambiente, 2018, p.59)	 <p>Figura 1.17. <i>Echeveria sp</i> : conchita. Secretaría del medio ambiente. (2018)</p>
<i>Kalanchoe Sp "Kalanchoe"</i>	"Descripción: Planta perenne, 60cm de altura, hojas verdes ovales y oblongas, dentadas. Todo el año produce hojas coloridas según la variedad (ver figura) Vive 2 años" (Secretaría del medio ambiente, 2018, p.62)	 <p>Figura 1.18. <i>Kalanchoe sp</i>: Kalanchoe. Secretaría del medio ambiente. (2018)</p>
<i>Lampranthus Spectabilis "Cortina"</i>	Descripción "Planta suculenta perenne, tallos erguidos de 30 cm de altura; hojas cilíndricas, grisáceas (ver figura) Vive 4 años" (Secretaría del medio ambiente, 2018, p.64)	 <p>Figura 1.19. <i>Lampranthus spectabilis</i> : cortina. Modificado de Secretaría del medio ambiente. (2018)</p>
<i>Mesembryantemum crystalium "rocío"</i>	"Descripción: Planta perenne, con hojas ovales carnosas, lisas y verdes, alcanzan 60 cm de largo, produce pequeñas flores de color rosa (ver figura) vive 2 años. (Secretaría del medio ambiente, 2018, p.68)	 <p>Figura 1.20. <i>Mesembryantemum crystalium</i>: rocío. Secretaría del medio ambiente. (2018)</p>

<p><i>Lampranthus Spectabilis</i> "Cortina "</p>	<p>Descripción "Planta suculenta perenne, tallos erguidos de 30 cm de altura; hojas cilíndricas, grisáceas (ver figura) Vive 4 años" (Secretaría del medio ambiente, 2018, p.64)</p>	 <p>Figura 1.19. <i>Lampranthus spectabilis</i>: cortina. Modificado de Secretaría del medio ambiente. (2018)</p>
<p><i>Mesembryantemum crystalium</i> "rocío "</p>	<p>"Descripción: Planta perenne, con hojas ovales carnosas, lisas y verdes, alcanzan 60 cm de largo, produce pequeñas flores de color rosa (ver figura) vive 2 años. (Secretaría del medio ambiente, 2018, p.68)</p>	 <p>Figura 1.20. <i>Mesembryantemum crystalium</i>: rocío. Secretaría del medio ambiente. (2018)</p>

TABLA 1.3. ESPECIES AUTÓCTONAS DE CIUDAD DE NEZAHUALCÓYOTL

VEGETACIÓN EN FACHADAS VERDES DIRECTAS E INDIRECTAS

En este tipo de sistema se emplean plantas trepadoras, estas especies de pueden contener dos tipos principales de follaje, perenne o caduco (ver tabla 1.4). Las perennes mantienen su follaje todo el año y las de hoja caduca pierden sus hojas durante el otoño, teniendo un fuerte cambio visual a lo largo del año. Las plantas trepadoras pueden ser autosuficientes, uniéndose a la superficie vertical (las escaladoras de raíz y ventosas adhesivas se caracterizan por esta cualidad) también hay especies que necesitan ser apoyadas por una estructura donde pueden sostenerse, como las vides, escaladoras de tallo, escaladoras de hojas y plantas de aleatorización. (Manso y Castro, 2014, p.867)

Especie	Descripción	Imagen
PERENNE		
<i>Hedera hélix</i> (Hiedra Común)	Planta trepadora, perenne y leñosa de hasta 30 m, caracterizada por presentar raíces adventicias provistas de minúsculos discos que le permiten trepar; ramas floríferas de forma romboidal-lanceolada; con flores pequeñas verdosas dispuestas en umbela, que hacen su aparición en otoño en plantas de al menos 10 años. (Vibrans H. , 2009)	 <i>Figura 1.21 Hedera hélix. Sannicolasdeugarte, (2010)</i>
<i>Lonicera japonica</i> (Madre selva del Japón)	Se trata de arbustos perennes lianosos que pueden alcanzar los 10 metros de longitud. Florecen en verano y en ocasiones en otoño. Son plantas de crecimiento rápido y muy rústicas que se utilizan para cubrir pérgolas, rejas y muros. Conviene ayudarlas a trepar con algún tipo de soporte. Estas madreselvas prefieren una exposición de sombra o de semi sombra, evitando los rayos del sol en las horas más calurosas del día. Es mejor que las temperaturas sean frescas y pueden resistir heladas. (Consulta Plantas, 2018)	 <i>Figura 1.22. Lonicera Japonica. Zimbres, (2007).</i>
CADUCIFOLIO		
<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (Viña Virgen)	Son arbustos trepadores caducifolios de ramas cilíndricas y zarcillos como ventosas que pueden superar los 15 metros de altura. Florecen a finales de primavera y principios del verano. Producen frutos de color negro azulado. Por su rápido crecimiento se emplean para cubrir fachadas, muros y pérgolas; tienen zarcillos que no dañan las paredes. Son adecuadas para zonas del jardín orientadas al norte o al este. (Consulta Plantas, 2018)	 <i>Figura 1.23. Parthenocissus quinquefolia. Sturner. (2003).</i>
<i>Clematis</i>	La clematis enredadera, trepadora o escaladora, son muy populares, no solo por el tipo de follaje que ofrecen, sino por la forma y colores de sus flores. De la misma forma que la caléndula, se pueden conseguir durante la mayor parte del año, se puede cultivar muy bien en el suelo de un jardín o también crece y se desarrolla cuando se planta en macetas. Se da muy bien en el sol, pero también resiste la semi sombra, y los climas templados, no requiere de mucho riego, sino de un terreno bien drenado, para evitar que el agua empozada pueda pudrir las raíces de esta planta. (Hablemos de flores, 2015)	 <i>Figura 1.24. Clematis.Janner, (2009).</i>

TABLA 1.4. Especies de plantas empleadas en fachadas verdes,

VEGETACIÓN EN PAREDES VIVIENTES (LIVING WALLS)

Ejemplos recientes de paredes vivientes modulares incluyen la opción de utilizar alfombras de suculentas en lugar de plantas perennes y arbustos. El uso de especies de plantas tolerantes a la sequía como suculentas reduce las necesidades de riego. Estas especies de plantas requieren menor mantenimiento y contribuyen a la minimización del peso del sistema. Sin embargo, las alfombras de suculentas adquieren la apariencia de una superficie plana con vegetación, que puede ser interesante en paredes pequeñas. En superficies más grandes, el uso de plantas perennes y arbustos permite la creación de paisajes más ornamentados debido a la variedad de colores y texturas que estas plantas pueden incluir. (Manso y Castro, 2014, p.867)

VEGETACIÓN EN TECHOS VERDES

Apesar de que es difícil seleccionar una especie de planta que posea todas las características deseables se ha identificado vegetación apropiada para techos verdes. Las especies del tipo suculento han sido uno de los taxones más intensamente examinados. De los diferentes tipos de suculentas, las especies *Sedum* son las más populares y confiables para los techos verdes extensivos en el mundo, debido a su capacidad de limitar la transpiración y almacenar el exceso de agua en sus hojas para sobrevivir a las condiciones de sequía. Por su naturaleza, pueden aumentar la eficiencia del uso del agua de la vegetación y el almacenamiento de CO₂ durante la noche, cuando las tasas de evaporación son menores que durante el día. (Vijayaraghavan K., 2015, p.744)

En la tabla 1.5 se enlistan algunas de las especies utilizadas en los techos verdes.

Especie	Descripción	Imagen
<p><i>Portulaca gilliesii</i> (Flor de seda)</p>	<p>Esta especie se ocupa frecuentemente en techos verdes por su buen comportamiento ante la sequía, se caracterizan por tener un color rojizo. Se recomienda no emplear esta especie en zonas con bajas temperaturas extremas. Puede presentar cambios fisiológicos ante la falta de nutrientes o condiciones de estrés. En otoño presenta defoliación. (Soto et. al, 2011)</p>	 <p data-bbox="1117 554 1471 617"><i>Figura 1.25. Ocna Sibiului la soare. Greslou,(2008)</i></p>
<p><i>Sedum mexicanum</i></p>	<p>Su crecimiento es rápido con buen comportamiento en condiciones de altas temperaturas. Durante el invierno, en general, mantiene la masa verde y en algunos casos puede verse reducido su tamaño pero no desaparece. No presenta mortandad frecuente. Soporta condiciones extremas de sequía y ante la falta de nutrientes muestra rápidamente un amarillamiento en el follaje (Soto et. al, 2011)</p>	 <p data-bbox="1073 890 1516 953"><i>Figura 1.26. Sedum mexicanum Gold Moun. Zima, (2012)</i></p>
<p><i>Sedum acre</i> (Pampajarito)</p>	<p>Se distingue por ser un excelente colonizadora, además presenta un buen crecimiento durante bajas temperaturas. Soporta condiciones de sequía con temperaturas medias pero no tolera temperaturas altas extremas. No presenta cambios fisiológicos ante la falta de nutrientes. (Soto et. al., 2011)</p>	 <p data-bbox="1062 1278 1516 1341"><i>Figura 1.27. Sedum acre. Dog of the forest, (N.d)</i></p>
<p><i>Sesuvium portulacastrum</i> (Rocío)</p>	<p>Dentro de la familia Aizoaceae es considerada una de las más resistentes a la salinidad y a las sequías. Su crecimiento es acelerado y se propaga rápidamente. Es extremadamente susceptible al exceso de agua. Es una planta tropical adaptada a crecer en ambientes cálidos y por esto es muy susceptible a temperaturas inferiores a los 5°C. Las heladas son mortales. (Naturaleza tropical, 2017)</p>	 <p data-bbox="1094 1667 1479 1722"><i>Figura 1.28. Sesuvium portulacastrum. Eickhoff, (2008).</i></p>

Tabla 1.5. Especies empleadas en azoteas verdes

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS VERDES

VENTAJAS

La aplicación de muros y azoteas verdes ha sido ampliamente estudiada ya que contribuyen a la inserción de la vegetación sin ocupar espacio a nivel de la calle. Al mismo tiempo, la aplicación de sistemas verdes puede tener, además de beneficios ambientales, beneficios sociales y económicos como se muestra en la figura 1.29. (Manso y Castro, 2014, p.864)

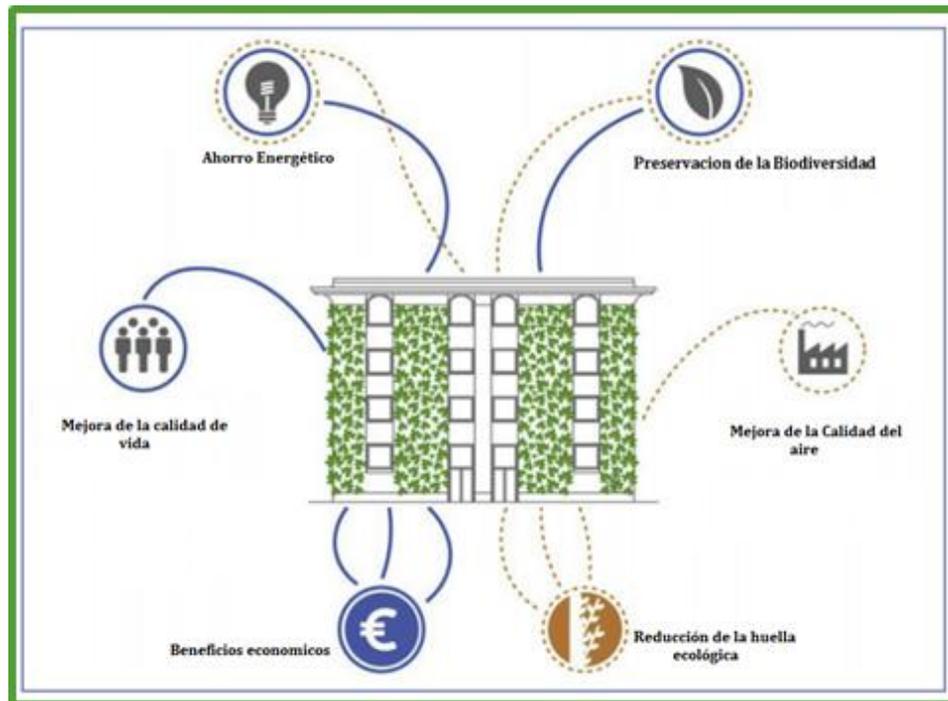


Figura 1.29. Esquema de actividades monitoreadas desde 2014. Modificado de Rosasco P. & Perini K. (2018).

CALIDAD DEL AIRE

Los muros y techos verdes son una solución conveniente al problema de la calidad de aire gracias a la capacidad que posee un sistema de naturación de absorber los contaminantes como CO₂, NO₂ y las concentraciones de material particulado suspendido (fig. 1.30). Esto se logra mediante aportación de las plantas y sus microorganismos que pueden depurar el

aire, atrapándolos por medio de estomas y convirtiendo varios contaminantes en sus formas no tóxicas. Indirectamente los sistemas verdes también contribuyen a reducir la mala calidad del aire por medio del ahorro energético, ya que este sector es responsable de la quema de combustibles fósiles. (Paull, *et. al.*, 2018, p.448; Pettit, *et. al.*, 2017, p. 299; Muhammad, *et. al.*, 2018, p. 765)

El potencial de eliminación de los contaminantes de un sistema verde se ve influenciado por la geometría del cañón de la calle, la velocidad del viento, la humedad y el IAF (Índice de área de la hoja). (Joshi y Ghosh, 2014; Pugh *et. al.*, 2012).



Figura. 1.30. Acumulación de material particulado visible en una hoja de S. amate (flechas). Paull. et. al.,2018.

Simultáneamente el sustrato y la planta proporcionan un tratamiento al agua empleada en el riego de la naturación, ya que él es capaz de retener en su estructura los contaminantes disueltos en el agua que son degradados mediante la actividad biológica desarrollada en sus cavidades y también de limpiar contaminantes volátiles presentes en el aire si este es forzado a pasar a través del sustrato

MANEJO DE AGUA PLUVIAL

Con el correcto diseño de los muros y azoteas verdes, estas tecnologías pueden aportar un control de flujo máximo de escorrentía provocada por la lluvia, esta característica está en función del tiempo de retención del sustrato, así como, el volumen y profundidad del

mismo. (Manso y Castro, 2016; Vijayaraghavan, 2015, p. 742). La vegetación puede absorber el agua de lluvia y almacenarla en los tejidos de la planta o transmitirla a la atmósfera. El agua también se retiene en la tela del geotextil o bien en los elementos de drenaje de las azoteas, debido al potencial de almacenar agua entre los poros (en el caso de los gránulos) o los compartimentos (en el caso de los módulos de drenaje). (Vijayaraghavan, 2015, p. 742)

La capacidad de retención de un techo verde se puede determinar por medio de la siguiente ecuación (Ugai T., 2016, p. 852):

$$Wp = P \times A \times RC$$

Donde:

Wp = Volumen potencial de captación de agua, L / año

P = Precipitaciones locales, mm / año

A = Área de captación, m^2

RC = Coeficiente de escorrentía

Con base en lo anterior se determinó que los techos intensivos reducen entre un 65% - 85% el escurrimiento anual de una precipitación, mientras que los techos extensivos, les corresponden valores del 27 - 81% (Mentens, *et. al.*, 2006). Gregoire y Clausen, en 2011 encontraron que los techos verdes extensivos construidos con el propósito de reducir los escurrimientos pluviales son capaces de interceptar, retener y evapotranspirar del 34 – 69% de la precipitación, con una tasa de retención promedio del 56%. Zhang, *et. al.* (2015), reportaron retenciones desde el 35% hasta el 100%, con un porcentaje promedio de 77.2%, además de una reducción en la concentración de SST. Al elegir la pendiente de un techo verde debe tomarse en consideración que mayor pendiente, menor será su capacidad de retención (Getter, *et. al.* 2007). Otro aporte que estos sistemas ofrecen es la capacidad de neutralizar la deposición ácida que contiene la lluvia y abatir la carga de contaminantes, convirtiéndose en un sumidero de $NH_4 -N$ (Zhang, *et. al.* 2015).

REDUCCIÓN DEL EFECTO ISLA DE CALOR

El término efecto isla de calor se refiere a la absorción de calor entre una variedad de materiales de los cuales, el concreto es uno de los más destacables. Como se ilustra en la fig. 1.31, a la misma hora del día en los lugares con mayor densidad de edificios la temperatura es más alta, por el contrario, en los espacios con menor cantidad de edificación

y poblados de vegetación, las temperaturas se ven reducidas. Esta es la razón por la que los muros y azoteas verdes representan una gran alternativa para reducir el efecto isla de calor de las ciudades.

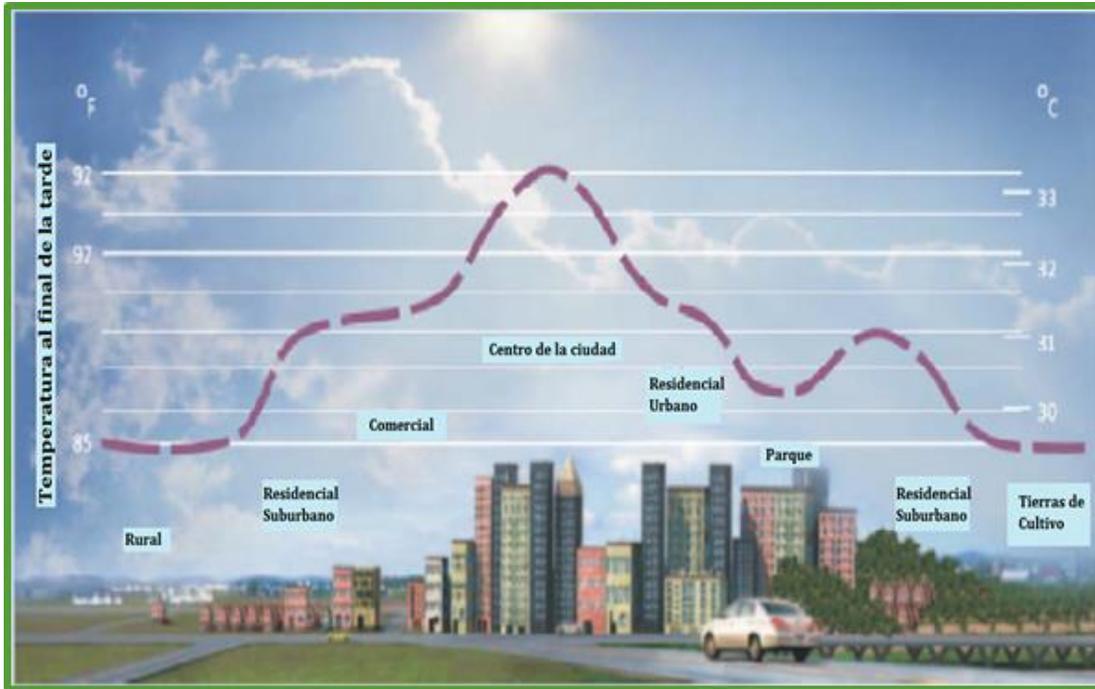


Figura 1.31. Las islas de calor urbanas aumentan el consumo de energía. Modificado de Besir y Cuce. (2018)

Los sistemas verdes reducen las temperaturas debido al intercambio de calor convectivo entre el follaje de una pared cubierta y el aire, ya que son más suaves que entre el aire y el concreto de una pared desnuda, así también los intercambios de calor radiactivo, pues las superficies con vegetación dan lugar a la redistribución de dicha radiación por lo que los intercambios de calor de este tipo son menores. Además, el empleo de sistemas de naturación como muros y azoteas verdes empleados en conjunto, garantizan una absorción de calor menor ya que cuando se emplean de forma aislada, las masas de aire ingresan al cañón y se calientan en los tejados planos que absorben la gran cantidad de insolación de verano. Pero si un cañón contiene vegetación, el calor se reduce debido a la evapotranspiración, que actúa como disipadora de calor (ver fig. 1.32). (Alexandria y Jones, 2008, p. 485). Se entiende por "cañón" a la forma que toma una corriente de aire que se conduce entre dos edificios (ver figura 1.33) por lo que la implementación de superficies verdes reduce la velocidad del viento de tal modo que no se produce calentamiento por fricción.

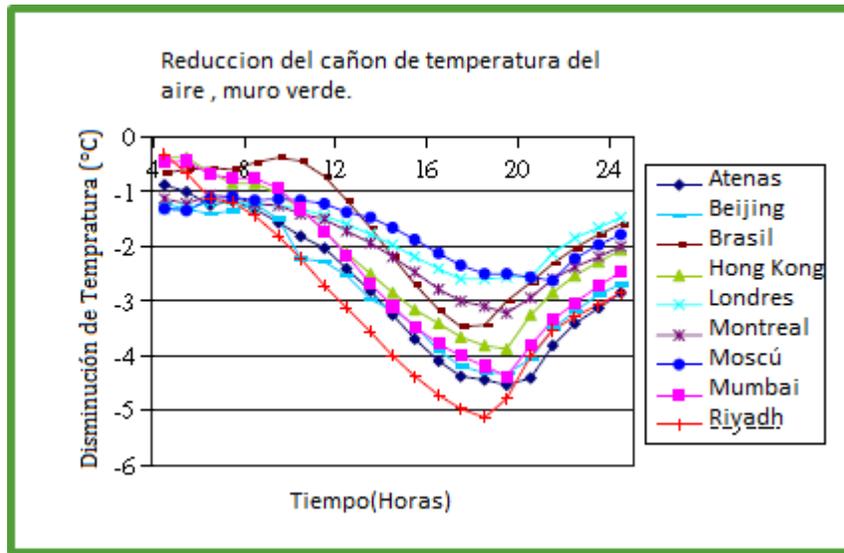


Figura 1.32. Reducción del cañón de temperatura del aire, con flujo paralelo de aire, cuando las paredes solo son cubiertas con vegetación, para todos los climas examinados. Alexandria E. y Phil Jones P. (2008).

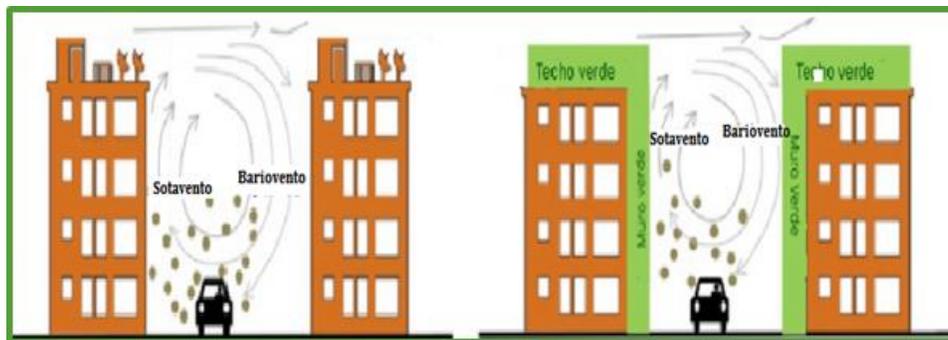


Figura 1.33 Dispersión y trayectoria de contaminantes en una estructura de cañón de calle. Modificado de Abhijith, et al. 2017.

Cameron *et. al.*, en 2014 encontraron que el tipo de planta que se elige en un muro verde impacta en su eficiencia de enfriamiento. Por ejemplo, encontraron que la especie *Prunus laurocerasus* reduce significativamente las temperaturas del aire en los sitios donde se coloca, alrededor de 3°C, en comparación con muros libres de vegetación e incluso, con muros con vegetación que no transpira. Las especies *Stachys* y *Hedera* alcanzaron una reducción en la temperatura en más de 7°C. Por ello, tanto la fisiología de las plantas como

el área y morfología de sus hojas, debe considerarse para maximizar el efecto de enfriamiento en muros verdes.

AISLAMIENTO TÉRMICO

Una investigación realizada en el sur de Italia revela que los techos verdes (sin ningún material de aislamiento) son más fríos en unos 12°C en comparación con los techos convencionales de acuerdo con las mediciones de temperatura superficial promedio en verano. Incluso en la temporada de invierno, la diferencia de temperatura entre los convencionales y los techos verdes son notables por casi 4°C. Desde este punto de vista, los edificios con techos verdes consumen menos energía en comparación con los techos convencionales. (Besir y Cuce, 2018, p. 920-921). A partir de experimentos, también se ha demostrado que el techo verde no aislado reduce la temperatura de la superficie exterior a unos 36°C, mientras que los techos verdes con techo verde aislado pueden reducir hasta 54°C. (Muhammad, *et. al.*, 2018, p. 759)

Por su parte Lee y Jim (2017, p. 2) realizaron una investigación sobre la capacidad de enfriamiento de las fachadas verdes a través de un monitoreo *in-situ* de dos especies de plantas trepadoras en zonas urbanas de Hong Kong. Los resultados obtenidos muestran que los principales beneficios térmicos ocurrieron en la superficie exterior del edificio durante los días soleados. Durante el día, el enfriamiento promedio de la superficie del edificio exterior promedio varió de 0.52 a 3.49 °C y 0.55 a 2.73 °C respectivamente con *Wisteria sinensis* y *Lonicera japonica*. El enfriamiento nocturno fue bastante moderado, que va desde 0.03 a 0.78 °C y 0.11 a 1.25 °C respectivamente con *Wisteria sinensis* y *Lonicera japonica*. Este estudio sugiere que la orientación del muro podría tener prioridad sobre las especies trepadoras en el diseño de la pared verde. En lo que respecta a el rendimiento del aislamiento térmico en muros verdes, Manso y Castro (2016) mencionan que incrementar espacios verdes con muros de este tipo podría reducir hasta en 10°C la temperatura en áreas mediterráneas.

SOMBRA POR VEGETACIÓN

La vegetación urbana tiene impactos directos, es decir, los debidos a las modificaciones de la envolvente del edificio (sombreado y disminución de los flujos de calor convectivo mediante la reducción de la velocidad del aire en la pared cercana). Cuando está presente, una capa de sustrato también aumenta la resistencia térmica del envolvente. (Musy, *et al.*, 2017, p.604). Koyama *et. al.* confirmaron la reducción termica por sombreado en promedio ronda los 8.55°C sobre la evapotranspiración (0.23°C) en el interior del edificio.

EVAPOTRANSPIRACIÓN

La integración de la vegetación a la superficie del edificio es una forma efectiva de controlar esta ganancia de calor ya que la vegetación absorbe el calor solar y evapora el agua a través de funciones biológicas y metabolismo, un proceso conocido como evapotranspiración que esencialmente crea un efecto de enfriamiento en el entorno. El potencial de enfriamiento evaporativo de la capa de vegetación puede depender de las características de la especie empleada, entre ellas la densidad del follaje y el grosor de la hoja. (Morakinyo, *et. al.*, 2017, p. 227) . La evapotranspiración se compone de evaporación y transpiración. El contenido de agua del suelo se transfiere del suelo al aire durante la evaporación. A diferencia de la evaporación, la transpiración tiene lugar en las hojas y el cuerpo de las plantas, como liberación del vapor de agua de los estomas en las hojas y la piel de poro del dosel. Las hojas eliminan el calor del medio, a través de la pérdida de calor radiativo de longitudes de onda largas (400-700 nm). El calor sensible y latente también se disipa por convección y evaporación, respectivamente. La humedad juega un papel clave para mantener la regulación térmica tanto en ambientes húmedos como en secos. Cuando la cantidad de contenido de agua del aire aumenta por la vegetación, el calor se disipa por la evapotranspiración. (Besir y Cuce, 2018, p. 922)

REDUCCIÓN DE ALBEDO

Medl. *et. al.* (2017) mencionan que con una configuración adecuada en los sistemas de naturación, el albedo o porcentaje de radiación que puede reflejarse sobre estas superficies verdes se logra reducir considerablemente, mientras que al mismo tiempo reduce el estrés térmico. La luz solar directa en la fachada o muro verde se filtra por las hojas, gracias también al efecto de fototropismo. Del 100% de la energía de la luz solar que cae sobre una hoja, 5-30% se refleja, 5-20% se usa para la fotosíntesis, 10-50% se transforma en calor, 20-40% se usa para la evapotranspiración y 5-30% se pasa a través de la hoja (Krucze, *et. al.*, 1982, citado por Ottelé, *et al.*, 2011).

AHORRO ENERGÉTICO

Por ejemplo, si se emplea una fachada de doble capa con enredaderas caducifolias se puede obtener un ahorro del 33.8% en el uso de energía en época de calor y hasta un 58.9% si se emplean plantas perenes en un muro verde (Coma, *et. al.*, 2017).

El rendimiento energético en términos de envolvente se puede describir como la minimización de la necesidad de energía para calefacción y refrigeración debido a las propiedades estructurales de la envolvente.(Besir y Cuce, 2018, p. 920) .

Una investigación experimental (Monitoreo en campo) fue realizada para evaluar el potencial de enfriamiento de un sistema de vegetación vertical durante el verano, pues se sabe que la capacidad de enfriamiento puede ser explotada para reducir la demanda de energía por aire acondicionado resultando en un importante beneficio económico. Para el experimento se construyó un sistema como el que se muestra en la figura 1.34, la cubierta del edificio se compone por capas que influyen altamente la temperatura interior desde el material de aislamiento del edificio. Para conocer la participación de las plantas en la capacidad de enfriamiento, se colocó un ducto cuyo diámetro es de 8 cm, fue construido atravesando la pared del edificio, por detrás del sistema de vegetación vertical, conectando una superficie interna con la superficie externa. Dentro de los ductos se colocó un impulsor o ventilador axial de 80 x 80 x 25mm, con flujo máximo de aire de 41 m³/h, cuya función es extraer aire de fuera para suministrarlo en el interior. Además, se emplearon especies vegetales de los alrededores, *Estepas* con nombres científicos de “*Cistus Jessami beauty*” y “*Cistus crispus*”. Se construyó otro ducto con las mismas características con el fin de monitorear el efecto del sistema de vegetación vertical sobre la temperatura, y este segundo ducto se encuentra 4 metros por debajo y extrae aire del exterior sin la influencia de la vegetación, con ello, se obtuvo el decremento de la temperatura mediante la comparación de una pared con vegetación y una que no tiene. (Rosasco y Perini, 2018, p. 527)

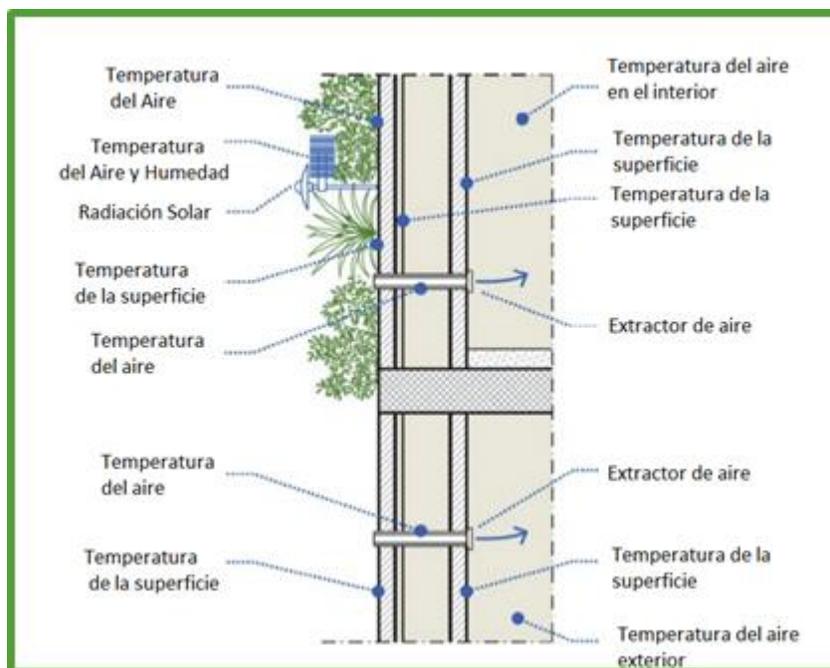


Figura 1.34. Elementos de Sistema de vegetación Vertical (Sistema de Monitoreo de Energía). Rosasco y Perini, 2018. Modificada de Rosasco P. & Perini K. (2018)

Mediante el monitoreo llevado a cabo por Rosasco y Perini (2018), se obtuvo la siguiente tabla resumen mostrando los beneficios del ahorro energético al emplear sistemas verdes (ver tabla 1.6). En el mes de junio del 2015 se obtuvo un consumo energético de 2935 kWh sin presencia de vegetación, mientras que cuando se tienen instalados sistemas de vegetación se obtuvo un consumo energético de 726 kWh que es casi 4 veces menor.

Mes	Aire extraído del exterior	Demanda de energía sin vegetación	Aire extraído detrás del sistema de vegetación vertical	Demanda de energía con vegetación	Delta kWh [kWh]
2015					
Junio	26.5	2935	21.3	726	24.7
Julio	29.8	4637	24.6	2265	48.8
Agosto	27.3	3344	22.7	1257	34.6
Septiembre	23	1326	19.2	202	15.2
TOT 2015		12242		44450	7792

2016					
Junio	25.6	2537	22.6	1225	48.3
Julio	23.8	1900	21.7	986	33.6
Agosyo	21.3	706	18.3	123	4.2
Septiembre	23.2	1412	21.1	605	20.6
TOT 2016		6555		2939	3616
2017					
Junio	22.2	1061	20.7	540	50.9
Julio	25.6	2721	23.7	1855	68.2
Agosto	26.3	2888	20.1	372	12.9
TOT 2017		13225		57065	7519

*Tabla 1.6. Demanda de Energía del edificio sin y con Sistemas de Vegetación vertical.
Modificada de Rosasco y Perini (2018)*

En el estudio llevado a cabo en “*Green Roofs an facades: A comprehensive review renewable and sustainable energy*” se menciona que los techos verdes pueden reducir la pérdida de calor en verano e invierno entre el 70-90% y 10-30% respectivamente, mientras que los muros verdes pueden reducir la ganancia y pérdida de calor 95% y 26%. Por otro lado, se encontró que los sistemas de vegetación vertical reducen la carga de enfriamiento pico transferida a través de las paredes en un 28% en un día soleado. Las superficies verdes absorben alrededor del 70% de la radiación solar entrante (Besir y Cuce, 2018, p. 920).

REDUCCIÓN DE RUIDO

Existen estudios que demostraron que los techos verdes pueden producir un aislamiento acústico en entornos urbanos pequeños que van de 5 a 10 dB (decibelio). Los factores que afectan la función de la vegetación en el aislamiento acústico son múltiples, como la especie, las dimensiones de la pantalla y la forma y ubicación con respecto a la fuente del ruido. Así también se sabe que el sustrato tiende a bloquear frecuencias bajas de sonido mientras que las plantas bloquean las frecuencias altas. Sobre los muros verdes hay poca información respecto a su capacidad de aislamiento acústico, sin embargo, existe un estudio realizado por Wong *et. al.* en el cual se determinó el coeficiente de absorción del sonido de

una pared verde en una cámara de reverberación. A partir de este experimento, se concluyó que el coeficiente de absorción acústica del sistema de vegetación estudiado tiene valores más altos que los de otros materiales de construcción y mobiliario. Además, se puede confirmar que el coeficiente de absorción incrementa al aumentar las frecuencias y con una mayor cobertura de vegetación. (Azkorra *et. al.*, 2015, p.47)

La disminución de ruido por vegetación se puede atribuir a 3 fenómenos. El primero se trata de un efecto de reflexión del sonido cuando rebota con las partes constituyentes de las plantas; el segundo se trata de una absorción atribuida a las vibraciones mecánicas de los elementos de la planta que son causados por las ondas de sonido mismas, lo que provoca su disipación de manera que la energía del sonido se convierte en energía calorífica. Por otro lado, existe una atribución a la capa límite termo viscosa en la atenuación del sonido. El tercero se trata de una interferencia destructiva de ondas sonoras por parte de la tierra, este efecto es conocido como suelo acústico. En el caso de sistemas verdes este efecto ocurre en el sustrato. La presencia de vegetación conduce a un suelo acústicamente muy suave (poroso), principalmente debido a la presencia de una capa de hojarasca y el enraizamiento de la planta. Este resultado es un efecto de suelo más pronunciado y produce un cambio hacia frecuencias más bajas en comparación con la propagación del sonido sobre pastizales. Como resultado, esta inmersión en el suelo es más eficiente para limitar las frecuencias típicas de ruido del motor (aproximadamente 0.100 kHz) de tráfico rodado. (Pérez, *et. al.*, 2014, p.46; Azkorra *et. al.*, 2015, p.46)

PROTECCIÓN CONTRA LOS EFECTOS DE LA INTEMPERIE Y PROLONGACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LAS CONSTRUCCIONES

Uno de los beneficios más importantes de los muros y azoteas verdes es que pueden proveer de sombra a la cubierta del edificio. La cubierta vegetal compuesta por hojas así como los paneles que conforman a los sistemas de naturación protegen del efecto corrosivo de la lluvia ácida, rayos UV, hielo, contaminación atmosférica y cambios de temperatura que a largo plazo producen agrietamientos a las superficies de concreto, esto se logra gracias a la capacidad de enfriamiento y aislamiento de estos sistemas lo que conduce a la reducción de la degradación de los materiales de revestimiento, prolongando su longevidad. Gracias a la protección brindada por la vegetación se obtienen beneficios económicos por el ahorro en costos del mantenimiento por hasta 20, 686 euros, cuando el período de vida útil es de un intervalo de 35 a 45 años). En el caso de que el tiempo de vida

útil sea de 50 años, el beneficio económico estimado es de 22, 919 euros. (Medl., *et. al.*, 2017, p.39-45; Bradley, 2011, p. 2104; Rosasco & Perini , 2018, p.529; Manso y Castro, 2016)

BENEFICIOS ECONÓMICOS

Uno de los beneficios que ofrece en climas mediterráneos una vivienda que cuenta con sistemas de climatización es el ahorro de energía derivado por la reducción de climatización en verano, así también el incremento de la durabilidad de algunos de los componentes externos de los edificios aminora los costos de mantenimiento. Incluso, los servicios ecosistémicos promueven actividad turística que agregan beneficios económicos. (Rosasco y Perini, 2018, p. 524; Gómez, *et. al.*, 2013)

REDUCCIÓN DE IMPUESTOS

Entre las ya muchas partes del mundo como lo es Italia, se han implementado muchas leyes que proveen incentivos para que se instalen en los edificios sistemas que mejoren substancialmente el ahorro de energía, sistemas como muros y azoteas verdes. Los beneficios económicos se derivan en una reducción anual de impuestos que puede ser como máximo hasta por 10 años, aplicada a los costos de instalación. (Rosasco y Perini , 2018, p. 529)

En México a partir de la entrada en vigor de la Ley General del Cambio Climático (LGCC), se establecieron estímulos fiscales para las empresas que realicen actividades relacionadas con la investigación, incorporación o utilización de mecanismos, equipos y tecnologías que tengan por objeto evitar, reducir o controlar las emisiones de gases efecto invernadero; así como promover prácticas de eficiencia energética. Por ejemplo:

Se otorga un estímulo fiscal a los contribuyentes del impuesto sobre la renta que efectúen proyectos de investigación y desarrollo tecnológico, consistente en aplicar un crédito fiscal equivalente al 30% de los gastos e inversiones realizados en el ejercicio en investigación o desarrollo de tecnología, contra el impuesto sobre la renta causado en el ejercicio en que se determine dicho crédito.

Las empresas que acrediten que iniciaron operaciones en los sectores de alta tecnología, tendrán derecho a una reducción equivalente al 55% respecto del Impuesto sobre Nóminas, del 30% por concepto del Impuesto Predial y del 80% tratándose del Impuesto sobre Adquisición de inmuebles.

BENEFICIOS SOCIALES

Se ha sugerido que los espacios verdes reducen el estrés, reducen el tiempo de recuperación de pacientes gracias a que otras "dimensiones sensoriales" de la vegetación pueden conducir a mejoras en la salud, también mejoran la productividad de los trabajadores, aumentan los valores de las propiedades e incluso se han vinculado a una reducción de la delincuencia. El "ruido blanco", similar al sonido del viento crujiendo a través de las hojas, enmascara los sonidos que distraen e incluso puede brindar relajación. Los espacios en la azotea pueden incluso utilizarse como espacio para la agricultura urbana, lo que contribuye a garantizar la seguridad alimentaria. (Labuschagne y Zulch, 2016, p. 712; Ugai, 2016, p. 857)

BIODIVERSIDAD

Según Carpenter, se crean nuevos vínculos entre las zonas existentes y se pueden proporcionar hábitats adicionales para especies raras o importantes. Los sistemas verdes en el techo también aumentan el espacio comercial y recreacional. (Labuschagne y Zulch, 2016, p. 711-712). De igual manera cuando se eligen cuidadosamente y usan plantas atractivas en los muros y fachadas verdes, estos atraerán aves y mariposas. Algunas plantas trepadoras como la "*Hydrangea*" trepadora (hortensia) y "*La gloria de la mañana*" son conocidas por atraer mariposas, abejas y colibríes. Las fachadas verdes proporcionan agua, comida, protección y sitios de anidación y cría (Lundholm y Lizht, 2006).

REDUCCIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA

DISMINUCIÓN DE RESIDUOS

Como consecuencia de la prolongación de la vida útil de las construcciones que son sustentables, se obtienen menos materiales de desecho en los vertederos o basureros. La vida útil mecánica de un techo convencional típico es aproximadamente 20 años. Cuando tienen que removerse o transportarse los materiales viejos que los componen probablemente serán colocados en vertederos donde además de ocupar espacio, también lixivian contaminantes. Esto con base en la evidencia empírica ya que los techos verdes modernos son una práctica relativamente nueva. Apoyando esta afirmación, está una azotea con un sistema de tratamiento de agua en Zúrich, Suiza, que fue instalada en 1914, y reparada por primera vez en 2005, un periodo de 91 años. (Bradley, 2011, p. 2104)

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS

Actualmente, los desechos alimenticios son un problema de contaminación en lugar de un recurso. Estos nutrientes, adecuadamente compostados, podrían usarse para satisfacer los requisitos de alimentos urbanos. Desde desechos sólidos domésticos, institucionales y comerciales recolectados localmente hasta una gama completa de pequeños desechos industriales, desechos biomédicos y excretas humanas y animales, todos podrían convertirse en composta y emplearse en sistemas verdes. (Ugai, 2016, p. 857)

PRODUCCION DE ALIMENTOS

Incorporar en muros y azoteas verdes la producción de alimentos añadiría beneficios para el techado agrícola, como la mitigación de la pobreza, el desempleo, la inseguridad alimentaria, la diversificación de los ingresos y la salud humana. El aspecto de la agricultura urbana en muros y azoteas verdes es de gran importancia ya que la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, en México se producen al rededor del 20% de los alimentos para consumo propio. (Ugai, 2016, p. 857)

PRODUCCIÓN DE BIOMASA

Desde el cuarto año después de la instalación de un sistema de naturación vertical, la poda de las plantas produce alrededor de 700 kg de biomasa por año (4 metros cuadrados de madera) los cuales pueden emplearse en la generación de 0.4 kWh de energía eléctrica. En Italia, el precio de la recompra de la energía renovable producida fue de 0.1 €/kWh en el 2017. Por tanto, por cada año durante el período de vida útil apartir de los 25 a 50 años de un sistema de vegetación vertical, la biomasa producida por la poda de plantas será de 8750 kg; resultando en una producción de 105 kWh de energía eléctrica y a raíz de esta producción se obtiene un beneficio anual de 36.25 euros en el periodo de 25 años y de 53.9 euros cuando es de 50 años. (Rosasco y Perini,2018, p.527)

DESVENTAJAS

Aunado a los grandes beneficios que los muros y azoteas pueden ofrecer están las desventajas que podrían traer si no se elige correctamente la especie de planta, el tipo de

sustrato e incluso el sistema verde a emplear, como los altos costos iniciales de construcción, los altos costos de mantenimiento y los problemas de fugas.

LIMITACIÓN DEL USO DE ESPECIES

Para cumplir los objetivos de sostenibilidad, la vegetación debe tener pocas necesidades de riego (por ejemplo, el uso de plantas nativas), adaptarse a las condiciones locales de exposición (por ejemplo, sol o sombra) y las condiciones climáticas (por ejemplo, viento, lluvia, calor, sequía y escarcha). (Manso y Castro, 2014, p.869).

PROBLEMAS DE MANTENIMIENTO

Algunos de los tipos de sistemas verdes requieren de un alto mantenimiento debido a sus características, como la profundidad del sustrato y la complejidad del sistema. Lo que conduce al empleo de fertilizantes, mayor riego y deshierbado. (Vijayaraghavan, 2016). Debe considerarse también los costos por herramientas, y concepto de mano de obra que serán mayores a medida que se demande más mantenimiento.

Una irrigación excesiva y un carente drenado del sustrato, puede tener como consecuencia la muerte de la vegetación. Se piensa que las plantas caídas, muertas o pereciendo lo están debido a la falta de agua, sin embargo, en la mayoría de las veces es por exceso de esta. Algunos signos de sobre irrigación son: crecimiento de algas en el sustrato y plantas amarillentas o deslavadas indicativo de estrés de la raíz por exceso de agua (Riley, 2017).

DAÑOS A LA ENVOLVENTE

En la adaptación de techos verdes, los principales problemas que deberían preocupar son el aumento de cargas adicionales y la falla estructural. (Muhammad, *et. al.*, 2018, p. 757-760). En el caso de las fachadas verdes directas algunas especies de plantas trepadoras como la hiedra tiende a ser agresivas en el sentido de que pueden dañar las paredes del edificio debido a su raíz más gruesa. (Ebtesam, 2016).

INGENIERIA DE MUROS Y AZOTEAS VERDES

Para hacer la instalación de sistemas verdes es importante seguir criterios de diseño como la capacidad estructural del edificio y de drenaje a fin de asegurar un buen funcionamiento del sistema evitando daños e incluso el colapso del mismo. Estos criterios deben de estar apegados a la normativa vigente sobre instalación de sistemas verdes del lugar donde se vaya a construir.

Según la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México, estos son los requerimientos mínimos para calidad y seguridad de una cubierta naturada:

- **Impermeabilidad.** Los sistemas de naturación deberán garantizar el impedimento del paso de agua a la estructura de la losa, y con esto evitar un estado de saturación sobre la misma.
- **Resistencia y estabilidad.** Con base en lo establecido en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) y sus Normas Técnicas Complementarias (NTC), se tiene que garantizar la firmeza, seguridad, comportamiento estático y estructural de todos los componentes de la azotea verde a instalar.
- **Resistencia a la penetración por raíces.** Se tiene que garantizar que las raíces no penetren la capa impermeabilizante, así como a la losa, evitando daños a la estructura y componentes de la edificación.
- **Seguridad durante las maniobras.** La colocación de los componentes de la azotea verde debe de realizarse con la mayor seguridad y equipo necesario, además debe de estar a cargo de personal capacitado. También es necesario dejar los espacios requeridos para el mantenimiento, inspección y reparación de cualquier daño que pudiera suceder.

(GODF, 2008, p. 16-17)

PARÁMETROS DE CARGAS

En la tabla 1.7 se muestran los parámetros que deberán tomarse en cuenta en el diseño de los sistemas verdes.

<i>Carga muerta</i>	El peso final de todos los elementos construidos y todos los componentes asociados con el ensamblaje del techo o muro, incluyendo plantas, sustrato de crecimiento y agua contenida en el sistema.
<i>Carga viva</i>	El peso de la gente que usará el espacio, y todo el mobiliario que se ocupará periódicamente en el sitio, por ejemplo, mantenimiento (generalmente la carga viva aplica a los techos verdes, pero no a los muros o fachadas, sin embargo, sería adecuado en las superficies verticales si se coloca una plataforma de mantenimiento en el sistema).
<i>Cargas transitorias</i>	Cargas móviles o cambiantes a corto plazo, incluyendo viento y actividad sísmica.

Tabla 1.7. Cargas que deben considerarse para la instalación de sistemas verdes (Modificado de Department of Environment and Primary Industries, State of Victoria, 2014)

Con base en la Norma NADF-013-RNAT-2007 para efectos del cálculo estructural, el peso de la naturación será considerado como una carga muerta y el valor a tomar deberá corresponder con el indicado en la siguiente tabla:

Tipo de naturación	Extensiva	Semi- Intensiva	Intensiva
<i>Carga adicional</i>	110-140 kg/m ²	250 kg/m ²	>250 kg/m ²

Tabla 1.8. Peso de naturación. GODF, 2008.

En la tabla 1.9 se presentan las cargas de algunas especies de plantas empleadas en muros verde.

<i>Tipo de vegetación de un techo verde</i>	<i>Carga (Kg/m²)</i>
Suculentas y pastos	10.2
Perenes y arbustos bajos hasta de 1.5m	10.2-20.4
Césped	5.1
Arbustos mayores de 3 m	30.6
Árboles pequeños hasta 6 m	40.8
Árboles medianos hasta 10 m	61.2
Árboles grandes hasta 15 m	150

Tabla 1.9. Cargas para techos verdes, (FLL Guidelines).

En la tabla 1.10 se indica el peso de especies trepadoras ocupadas en los muros verdes.

<i>Especie</i>	<i>Carga (Kg/m²)</i>
<i>Jasminum</i> (jazmín), <i>Rosa</i> (Rosa)	6-12
<i>Clematis</i> (Clemátoide), <i>Tropaeolum</i> (Capuchina)	3-12
<i>Vitis</i> (Parra), <i>Ampelopsis</i>	12-26
<i>Lonicera</i> (Madreselva), <i>Actinidia</i> (Kolomitka), <i>Wisteria</i> (Glicir)	10-26

Tabla 1.10. Cargas de algunas especies trepadoras representativas, (Jakob Rope Systems).

PARÁMETRO DE DRENAJE.

Como lo establece la norma NADF-013-RNAT-2007 el desalojo de las aguas de cubiertas naturadas se logra a través de la capa drenante, la pendiente, los sumideros y las bajadas de agua o desagües; estos elementos deberán evacuar la totalidad del agua excedente de la cubierta evitando su acumulación sobre la misma. Los sumideros deberán contar con un dispositivo (rejilla, rejilla tipo domo, alcachofa, etc.) que permita retener los elementos sólidos que puedan obturar las bajadas de agua y deberán estar ubicados en un punto visible y de fácil acceso para realizar inspecciones y mantenimientos que garanticen su adecuado funcionamiento. Los rebosaderos son dispositivos para el desagüe que deberán considerarse como medidas de seguridad indispensables por lo que forman parte de los requerimientos previos. (GODF, 2008, p. 16-17)

CAPÍTULO 2. VIVIENDAS ECOLÓGICAS.

DEFINICIÓN

Según la definición de González (2010) una vivienda ecológica es aquella cuya construcción utiliza la energía de manera circular, esto quiere decir que se contemplan aspectos como reducción, reutilización y reciclaje, con ello, promueve un ciclo de eficiencia aprovechando los desechos como recursos renovables, de tal modo que reduce el impacto ambiental, contribuyendo en la disminución de gases efecto invernadero, erosión del suelo, preservación de especies y reversión del cambio climático, siendo clave para el desarrollo sustentable.

EDIFICACIÓN VERDE

Un edificio verde no necesariamente es aquel edificio que emplea sistemas de naturación que mitigan los efectos del impacto negativo ambiental, sino también puede ser aquel que es considerado como verde debido a que puede proveer beneficios gracias a su autosustentabilidad con tecnologías que provean ahorro energético, manejo de aguas residuales, etc. Una interrogante muy recurrente es si los edificios verdes son más costosos de construir que un edificio convencional, las respuestas se limitan a su aplicabilidad, ya que algunas variables importantes a considerar son la zona, los costos que varían conforme al país y sumado a esto a nivel global son muy pocas las edificaciones de este tipo lo que achica el panorama para poder tener un dictamen integral. Hadas, *et. al.*, 2014, p.558)

CRITERIOS DE DISEÑO

Se recomienda tomar en cuenta lo siguientes aspectos:

- Posicionamiento y orientación de la construcción para el aprovechamiento de la energía del sol.
- Empleo de materiales no tóxicos, y propios de la región.
- Captación y almacenamiento del agua de lluvia para reutilizarla más tarde.
- Producción de la energía que se consume.

BENEFICIOS

Dentro de los beneficios obtenidos se pueden mencionar los siguientes:

- Tratamiento de aguas grises.
- Tratamiento de aguas negras.
- Aprovechamiento de la energía solar.
- Aprovechamiento de energía eólica.
- Producción de vegetales

ELEMENTOS DE UNA EDIFICACIÓN

Las edificaciones verdes pueden contar con algunos de los siguientes elementos:

- Muros verdes o de alimentos (cultivos de verduras, cultivos de hortalizas y cultivos de hierbas).
- Techos verdes.
- Área para composta.
- Cultivos de verduras y hortalizas.
- Árboles de sombra, frutales.
- Paneles solares.
- Calentadores solares.
- Accesorios ahorradores de energía.
- Accesorios ahorradores de agua.

González (2010)

CERTIFICACIONES DE ORDEN INTERNACIONAL (LEED, LIVING BUILDING CHALLENGE DEL INTERNATIONAL LIVING FUTURE INSTITUTE, BREAM)

En los últimos 20 años se han desarrollado distintas certificaciones que promueven la construcción sustentable, evalúan las obras de infraestructura y dan prestigio. Sus criterios de sustentabilidad en infraestructura contemplan la disponibilidad de agua, el manejo de residuos, el desarrollo urbano, la infraestructura instalada, los diseños arquitectónicos compatibles y el impacto ambiental como social. Por ejemplo, en los estados unidos se desarrolló *LEED*, en reino unido *BREAM*, la estrella verde en África y el Sistema de calificación perla de Abu Dhabi por mencionar algunas. Mucho se ha escrito sobre estas herramientas y cómo se comparan entre sí. Todas estas certificaciones sirven como una línea de conducción para construir una vivienda ecológica.

Cada una de estas asociaciones tiene una serie de criterios bajo los cuales clasifican un edificio verde. Por ejemplo, los edificios reciben puntos para diferentes niveles de certificación según el conjunto de categorías establecido por el USGBC (U.S Green Building

Council) como localización y transporte, sustentabilidad, uso eficiente del agua, ahorro energético, materiales y recursos, calidad ambiental interior e innovación. La certificación internacional Living Building Challenge, creada en 2006 por el International Living Future Institute, tiene un sistema de calificación riguroso que busca que cumpla con, el uso de la energía cero, el tratamiento de los residuos y el agua, y un mínimo de 12 meses de operación continua. La certificación BREAM, la primera creada en su tipo, la realizó un grupo de empresas en el Reino Unido establece el estándar para evaluar el diseño, la construcción y su uso. Las medidas y criterios van desde la energía a la ecología. (Hadas, *et. al.* ,2014, p.558; Sánchez, 2014, párr. 4,20 y 22)

BENEFICIOS DE LAS CERTIFICACIONES

Algunos de los beneficios que pueden obtenerse a través de certificaciones sustentables son los siguientes:

- Espacios con mejores condiciones para la salud y productividad.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Acceso a incentivos fiscales.
- Disminución en los costos de operación y residuos.
- Incremento del valor de sus activos.
- Ahorro energético y de recursos.

Algunos ejemplos de edificios de este tipo pueden observarse en la figura 2.1.



Figura 2.1. Azoteas verdes Seleccionadas para el premio de Excelencia en construcción del 2016: Azoteas verdes en edificios residenciales (1,2), edificios institucionales (3,4), edificios comerciales (5,6) Shaffique, et. al., p. 758

CERTIFICACIONES EN MÉXICO Y PANORAMA INTERNACIONAL

En México existen actualmente 115 edificios certificados bajo el sello LEED que expide el Green Building Council, 6 proyectos bajo el Living Building Challenge del International Living Future Institute y 12 proyectos en la CDMX bajo el Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables (PCES). Además, México ocupa el segundo lugar, después de Brasil, en el número de edificios certificados bajo alguna norma o certificación de edificación sustentable en América Latina. (Sánchez, 2014, párr. 1 y 2).

A continuación, se describen las normas más importantes en México bajo las cuales se regularizan los edificios sustentables. Estas normas son emitidas por la Secretaría de Energía (Sener), sin embargo, se utilizan únicamente como un sistema de evaluación.

NORMAS DE EDIFICACIÓN SUSTENTABLE A NIVEL NACIONAL PCES

PCES, pretende establecer un estándar para calificar los edificios tanto habitacionales como comerciales y ofrecer así una serie de incentivos fiscales, que van desde descuentos en el

impuesto predial y licencias de construcción hasta financiamientos a tasas preferenciales y rapidez en la ejecución de trámites. (Sánchez, 2014, párr. 6).

NORMA "NMX-AA-164-SCF1-2013"

La NMX-AA-164-SCF1-2013 es una norma mexicana que especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos de una edificación sustentable, aplica a las edificaciones y sus obras exteriores, ya sean individuales o en conjuntos de edificios, nuevas o existentes, sobre una o varios predios, en arrendamiento o propias y se aplica a una o varias de sus fases: diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición, incluyendo proyectos de remodelación, renovación o reacondicionamiento del edificio. (Sánchez, 2014, párr. 7).

NORMA "NMX-AA-SCFI-157-2012"

Por su parte la NMX-AA-SCFI-157-2012 establecer requisitos y especificaciones de desempeño sustentable para desarrolladores y prestadores de servicios turísticos para la selección y preparación del sitio, diseño, construcción, operación y abandono del sitio de Desarrollos Inmobiliarios Turísticos que se ubiquen en la zona costera en la Península de Yucatán. (Sánchez, 2014, párr. 9).

HIPOTECA VERDE DEL INFONAVIT

La hipoteca verde del IFONAVIT Es un monto adicional que se le otorga a todos los créditos para que se disminuyan los consumos de agua, luz y gas, ahorrar dinero y contribuir a evitar que se agoten los recursos naturales. De esta manera, todas las viviendas que se compren, construyan, amplíen o remodelen con un crédito del Instituto, deben estar o ser equipadas con ecotecnologías que ahorren agua, luz y gas, tales como llaves, inodoros, focos, aislantes térmicos, calentadores solares, refrigeradores y estufas eficientes, así como lavadoras ahorradoras grado ecológico, entre otros. El monto adicional de crédito se fija de acuerdo con el salario del trabajador y el ahorro que logre con las ecotecnologías le permitirán pagarlo sin que se le dificulte. (INFONAVIT, 2018, párr. 3-5)

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ECOLÓGICOS Y DE ORIGEN NATURAL

En la edificación verde pueden emplearse materiales ecológicos, así como de origen natural. Además de elegir los materiales de este carácter se deben considerar los costos, requisitos sociales, características estéticas y la factibilidad de su uso. Los materiales de construcción ecológicos se refieren a materiales que son respetuosos del medio ambiente por lo que deben cumplir con algunos criterios como: uso racional de los recursos naturales; eficiencia energética; eliminación o reducción de desechos generados; baja toxicidad; conservación del agua y asequibilidad. Cabe señalar que este tipo de materiales cuando se utilizan con fines de construcción pueden ofrecer un conjunto de beneficios específicos para el propietario de la misma, como menores costos de mantenimiento, reemplazo reducido, conservación de energía, mejora de la salud y productividad de los ocupantes. (Kissia, *et. al.*, 2018, p.508)

Entre los materiales de carácter ecológico que se utilizan en construcciones de este tipo los siguientes.

CONSTRUCCIÓN CON BAMBÚ

El bambú en comparación con la madera es más eficiente por ser un material de mayor durabilidad, resistente y con apego al concepto de sustentabilidad, ya que es un recurso abundante tomando en cuenta que un pino tarda 40 años en generar un metro cúbico de madera mientras que el bambú tarda alrededor de 6 años. (Sánchez, 2013, p. 96; Sánchez C., 2013, p.6). El empleo de bambú en la construcción (fig. 2.2) se ha identificado como una forma potencial de reducir la presión sobre los recursos y el ambiente sin limitar las necesidades estructurales debido a su gran resistencia, flexibilidad y versatilidad. (Escamilla y Habert, 2014, p.117)



Figura 2.2. Casa hecha con bambú. Fuente: Ecoinventos. 2018.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO

Como lo expone Sánchez C. (2013) el bambú tiene buenas cualidades físicas para un material de construcción debidas a que:

- Es un material liviano que permite disminuir el peso propio de la construcción, también es un factor importante para construcciones resistentes al sismo y movimientos horizontales.
- Especialmente sus fibras exteriores lo hacen resistente a fuerzas axiales.
- La relación entre peso-carga máxima, así como, la forma cilíndrica del bambú lo convierten en un material perfecto para estructuras espaciales en donde trabajan solamente fuerzas axiales.
- El rápido crecimiento del bambú lo vuelve económicamente competitivo.

En el contexto ecológico el uso del bambú juega un papel importante:

- El bambú se utiliza como planta de reforestación.
- Si el bambú logra reemplazar la madera o el acero en algunas construcciones, la tala de la selva tropical se disminuiría.
- La manipulación del bambú desde el lugar donde crece hasta la obra demanda poca energía.

- Los materiales de construcción con base biológica como el bambú tienen la capacidad de secuestrar CO₂ durante su crecimiento, así como almacenarlo durante su fase de uso. (citado por Escamilla y Habert, 2014, p. 117)

Las desventajas de utilizar bambú según Sánchez C. (2013) son:

- La resistencia al esfuerzo cortante del bambú es baja lo que significa que tiende a rajarse fácilmente cuando se le aplican fuerzas perpendiculares al sentido de las fibras .
- La resistencia del bambú puede variar con respecto a la especie, al sitio donde crece, a la edad, al contenido de humedad y a la parte del culmo o de la sección que se esté utilizando
- No se puede regular el empleo de bambú en la construcción ya que no existe ningún código oficial que ofrezca una norma de clasificación para su uso estructural.
- Se requiere un riguroso mantenimiento para que el bambú tenga mayor durabilidad.

(2013 p. 37-38)

TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO

Como se mencionó el bambú tiene características físicas que lo hacen perfecto para la construcción ecológica, sin embargo, su uso requiere de un tratamiento para lograr condiciones ideales de resistencia y estética. La metodología para su acondicionamiento va desde su debida preservación hasta su secado. Es preferente usar cañas maduras por su menor contenido de humedad en comparación con las frescas (sin secado) o con las cañas no maduras en las cuales puede presentarse rajaduras, fisuras. (Morán, 2015, p.10)

También es importante proteger el bambú de las condiciones de la intemperie a las que estará expuesto este material como la humedad del ambiente, del suelo y de las lluvias, por lo que es necesario acondicionarlo con el aislamiento suficiente, ya que la humedad excesiva produce hongos como en cualquier otro material y los rayos solares blanquean y deterioran las cañas. Una opción para controlar este problema es construir una protección de aleros lo suficientemente amplios. (Morán, 2015, p.10)

MÉTODOS DE TRATAMIENTO

Los procedimientos de tratamiento y acondicionamiento del bambú para mejorar su desempeño como material constructivo pueden basarse en estándares establecidos en

manuales, entre ellos se encuentra el “Manual para la construcción sustentable con bambú” de la SEMANART, los métodos explicados en esta guía se describen a continuación.

MÉTODOS DE SECADO

Se recomienda realizar el cortado en la época en que la luna esta su fase cuarto menguante, en vista de que en este tiempo es cuando la luna ejerce menos influencia sobre el movimiento de líquidos en la tierra, y la atracción de la gravedad es mayor, con lo que los líquidos de todas las plantas no suben por los tallos tan fácilmente. Para evitar la formación de hongos, plagas de insectos y darle mayor vida útil al bambú. Los procedimientos para el curado del bambú son los siguientes:

- a. **Secado natural:** Consiste en apilar los culmos de bambú horizontalmente resguardandolos bajo cubierta para evitar el sol y la lluvia. Entre cada culmo debe dejarse una separación que permita la circulación del aire. Es recomendable dejarlos secar durante dos meses.
- b. **Secado artificial a fuego abierto:** Este procedimiento consiste en colocar los culmos de bambú sobre una cama de carbón encendido a una distancia de 50 cm, girando continuamente los culmos para un secado uniforme. Este método acelera el secado, pero debe ser realizado por un experto para evitar quemar o rajar el bambú.
- c. **Secado en estufa:** Este procedimiento consiste en colocar los culmos verticalmente dentro de un horno sellado sobre una fuente de calor, que puede ser una quema controlada de material, este método dura alrededor de tres semanas, trabajando día y noche. Es importante tener un buen manejo de aire y controlar la relación temperatura contra humedad en el interior del horno, para lograr un buen resultado. La mayor ventaja de este método es que el humo de la combustión se adhiere a las paredes del bambú, proporcionándole resistencia contra los insectos.
- d. **Secado en estufa solar:** Este método se realiza en una cámara especial y se basa en el aprovechamiento de la energía solar para calentar el aire que pasa a través del bambú. Se utilizan colectores solares, y el nivel de temperatura depende de las condiciones climáticas del sitio en que se esté secando. La velocidad del aire caliente se puede regular por medio de ventiladores y la humedad mediante ventanillas. Este método es más rápido que el secado natural y disminuye el riesgo de grietas y

rajaduras del secado en estufa, pues aquí los cambios de temperatura son menos drásticos.

MÉTODOS DE PRESERVACIÓN

Existen otros procedimientos para alargar la vida útil del bambú, la diferencia de uno y otro es la complejidad o costo para llevarlo a cabo. Los métodos de preservación más comunes son:

- a. **Método de tanque abierto:** Es el más recomendado por su facilidad, economía y alta efectividad. Los culmos se colocan en tanques con una solución preservadora a base de ácido bórico y bórax durante varios días, es necesario que los culmos tengan un alto contenido de humedad para lograr la correcta penetración del preservador por todo el bambú. El tiempo de remojo para lograr una preservación efectiva depende de la especie, la solución preservadora, la edad, o la condición de los tallos o culmos.

La solución preservadora para bambú contiene un kilogramo de ácido bórico, 0.5 kg de bórax y 48.5 litros de agua para obtener una solución al 3%. Esta solución es suficiente para 40 m lineales. Cuando el bambú se utiliza en condiciones de mayor riesgo, se utiliza una solución más concentrada que se obtiene con 100 litros de agua, 5 kg de ácido bórico y 3.7 kg de bórax decahidratado. Es necesario calentar el agua a 80 °C para facilitar la disolución de las sales.

- b. **Método de Boucherie:** El método consiste en conectar los culmos a mangueras de caucho o a un pedazo de neumático, que servirá como depósito para colocar el preservador; el culmo debe estar en posición vertical para que la solución se infiltre por el bambú por acción de la gravedad. Las características que deben tener los culmos para este procedimiento son; estar recién cortados, tener alto contenido de humedad, no tener ramas ni hojas. El tiempo que se recomienda es de 5 a 6 días, utilizando preservadores hidrosolubles.
- c. **Método de Boucherie modificado:** Con esta variante del método se reduce el tiempo de tratamiento y se pueden tratar más culmos al mismo tiempo. Se logra aplicando presión al contenedor para acelerar el proceso, reduciendo el tiempo de varios días que tarda el método común, a unas cuantas horas, lo que lo convierte en un método de tratamiento más rápido, eficiente y aplicable a gran escala. La presión es aplica con una bomba o compresor conectado a un contenedor herméticamente

cerrado, cuyas dimensiones dependen de la cantidad de culmos a tratar; Se recomienda colorear la solución para poder distinguirla cuando empiece a salir por el extremo del culmo. El tiempo que tarda este proceso es de tres a ocho horas. Es recomendable que el proceso se aplique dentro de las primeras ocho horas después de cortado el bambú.

(Ordoñez, *et al.*, n.d, p. 25- 28, 31-40)

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL BAMBÚ

El uso del bambú en la construcción debe estar apegado a consideraciones de orden estructural y soporte por las características del material, como por ejemplo no aplicar peso sobre el entrenudo, ya que puede provocar el aplastamiento del elemento y como consecuencia dañar toda la estructura. Para evitar este problema se deben colocar las cargas sobre los nudos y/o rellenar las cañas de concreto. Además, es necesaria la presencia de un nudo en cada extremidad de las cañas para evitar que se fisure. (Morán, 2015, p.10)

Así también, cabe destacar que la calidad de la construcción está subordinada a la calidad de cada uno de los materiales empleados en ella, particularmente del bambú puesto que este determina la rigidez, el soporte y confinamiento de la construcción, por lo que las exigencias técnicas en este material obedecen cierta rigurosidad según sea su empleo, que puede ser de alto desempeño estructural, bajo o con fines ornamentales. (Morán J., 2015, p.11)

También se debe tomar en cuenta que es difícil determinar un comportamiento estructural del bambú ya que su forma transversal no es perfectamente circular, tiene huecos y nodos a diferentes distancias por lo que lo hacen más difícil de resolver que la madera, concreto o acero. Por lo anterior para que el bambú pueda ser usado con mayor confiabilidad en construcciones a gran escala se deben diseñar métodos para resolver las uniones, la limitante que se tiene, es que es difícil que exista una normativa que pueda ser repetible debido a su morfología variable. (Ordoñez, *et. al.*, n.d, p. 41-43)

En la tabla 2.1 se muestran los tipos de uniones que se pueden realizar con el bambú, entendiendo que el objetivo de una unión es proporcionar continuidad entre los elementos estructurales de una construcción, es decir, que los esfuerzos puedan transmitirse de una manera segura y eficiente, y que las deformaciones se disminuyan hasta el mínimo. La estabilidad en las juntas debe ser resuelta en relación con el tiempo, para asegurar la permanencia por el periodo requerido de servicio de la edificación, requiere un análisis

apropiado para la solución estructural y constructiva para obtener un costo efectivo. (Ordoñez, *et. al.*, n.d, p. 41-43)

POLIETILENO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

El polietileno ha sido un material ampliamente investigado para ser reutilizado en el sector de la construcción, esto como alternativa a la carga ambiental generada por los elementos a base de plástico como botellas de PET, popotes, bolsas de plástico, etc. Puesto que es un material con buen comportamiento al trabajo por esfuerzos y por sus propiedades es ideal como material de construcción. Estas se describen detalladamente a continuación.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL PET

- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes.
- Alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Totalmente reciclable.
- Ligero.
- Resistencia y rigidez elevadas.
- Buena resistencia a la fluencia.
- Gran estabilidad dimensional

Entre otras propiedades del PET, este cuenta con una conductividad térmica de 0.24 W/mK lo que lo convierte en buen aislante térmico, tiene baja absorción de humedad, su permeabilidad le permite crear un barrera contra gases como el CO₂ y el O₂. (Muñoz, 2012, p. 49-50)

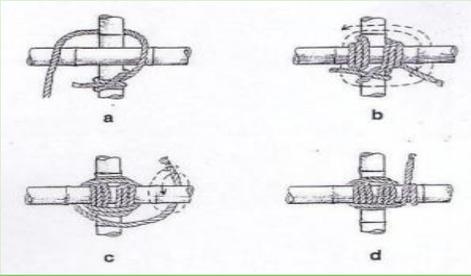
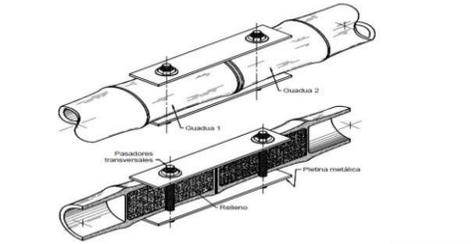
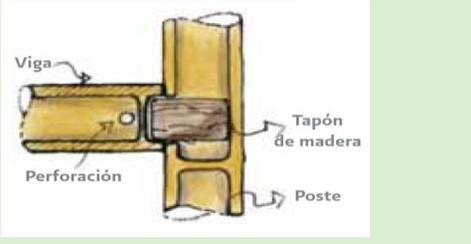
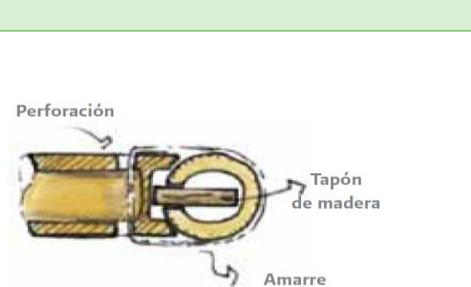
Tipo de unión	Ventaja	Desventaja	Recomendaciones	Función	Imagen
Con amarre	Son fáciles de realizar	No transmiten todos los esfuerzos	<ul style="list-style-type: none"> Los amarres no deben quedar flojos Utilizar alambre galvanizado 	<ul style="list-style-type: none"> Para cercas, barandales, pasamanos Para construir cubiertas temporales o andamios 	
Con pasadores	Rapidez al ensamblar	No aprovecha todo el diámetro del culmo para transmitir esfuerzos	Las perforaciones deben realizarse cerca del nodo	<ul style="list-style-type: none"> Para estructuras que requieren rapidez en su construcción Estructuras temporales 	
Con centro de madera	<ul style="list-style-type: none"> Mejor transmisión de esfuerzos Compatibilidad entre bambú y madera Estandarización de las uniones 	Se debe contar con equipo necesario	Utilizar una resina adecuada	<ul style="list-style-type: none"> Para estructuras tridimensionales Para solución de uniones en muebles 	
Combinación de sistemas	Fácil reemplazo de las piezas	Mayor cantidad de material	Hacer un buen diseño que facilite el reemplazo de piezas	Para reforzar o facilitar las uniones	

Tabla 2.1. Comparación de uniones. Ordoñez R., et al.

PROPIEDADES QUÍMICAS

Se puede destacar que el PET como material de construcción es multifuncional puesto que tiene una buena resistencia en general especialmente a grasas, aceites, alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes, pero presenta poca resistencia a solventes, sustancias aromáticas y acetonas, entre otros. Aunado a esto, el PET es inodoro, reciclable y no contiene componentes tóxicos como otros plásticos.

En vista de las cualidades del material se ha empleado en diferentes tecnologías de tal modo que se cumple con los objetivos de crear viviendas sustentables en las que se recupera toneladas de desperdicio de plástico. Algunas de estas tecnologías se explican detalladamente a continuación.

CONSTRUCCIÓN CON ECOLADRILLOS

Uno de los proyectos más relevantes en cuestión de reutilización de envases de PET es la aplicación de estos como ecoladrillos, esta técnica es conocida como ECOTEC Bi4PVS y fue ideada por el alemán Andreas Froese en 2001. Este sistema consiste en la autoconstrucción donde se utilizan las botellas PET no retornables como ladrillos, al rellenarlos de tierra u otros materiales del lugar y vinculándolos a otros formando una estructura (Fig. 2.3). Además ayuda en la búsqueda de sistemas alternativos y competitivos estructuralmente.

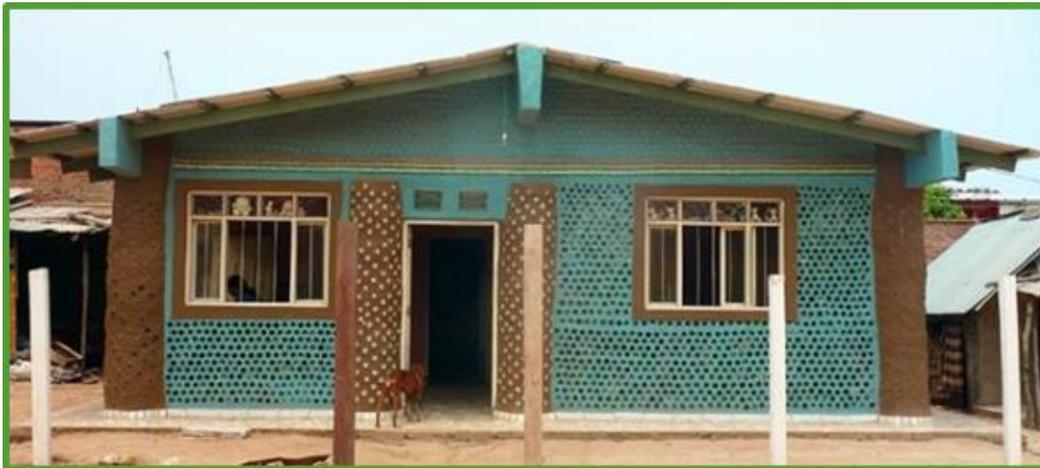


Figura 2.3 Casas hechas con botellas de plástico. Fuente: ar.blastingnews. 2015

VENTAJAS DE LA CONTRUCCIÓN CON BOTELLAS DE PET

Como lo plantean Espinosa (2016) y Ruíz, *et. al.* (2012) el desarrollo de la propuesta del sistema presenta varias ventajas importantes como son:

1. Duración: Las botellas plásticas (PET) tienen un período de degradación en el medio ambiente calculado en 200 a 300 años. Con lo cual se puede garantizar, por ese período, la estabilidad del material que contiene la tierra.
2. Aislamiento térmico: por tener como relleno tierra, resulta ser un buen aislante térmico, generando un diseño bioclimático.
3. Economía: Permite un ahorro hasta de 50% en materiales en comparación con la construcción convencional.
4. Autoconstrucción: El proceso de construcción es realizado por la misma comunidad local, sin necesidad de una capacitación particular.
5. Accesibilidad del material: por ejemplo, en México solamente se recicla entre el 10 y 15% de PET que se consume, por lo que se tiene una amplia oportunidad en la obtención de la materia prima.

(Espinosa, 2016, p.11; Ruíz, *et. al.*, 2012, p. 296)

COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL

Para garantizar el correcto comportamiento de este material se han realizado investigaciones en diferentes universidades en los últimos años que dieron como resultado que los muros construidos con botellas de PET absorben energías de impactos y soportan inclinaciones extremas sin colapsar (fig.2.4). Del mismo modo a través de pruebas de laboratorio se demostró que los *ecoladrillos* de 600 mL rellenos con arena tienen una resistencia a la compresión simple de 101 kN. Por otro lado, cuando un ecoladrillo se rellena con tepetate se obtiene una estabilidad térmica con un rango que va de los 21.1°C a los 25.1°C, además que los límites de humedad oscilan de 30 al 70 %.

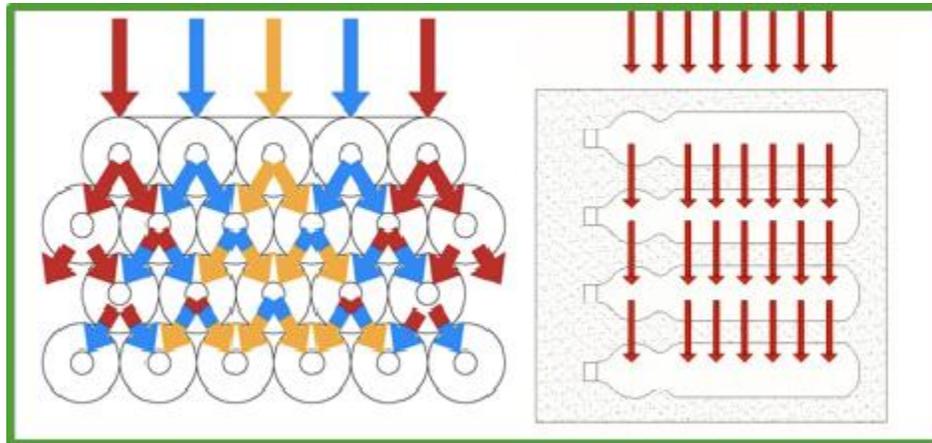


Figura 2.4 División de Cargas en los muros de PET. Fuente: Breitkopf S., 2012.

METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA ECOTEC BI4PVS

- I. La construcción debe estar sobre cimientos en piedra laja, ladrillo tolete común o ladrillo tolete cocido con algún tipo de impermeabilizante, que aisle la construcción de la humedad por capilaridad.
- II. Tener la cantidad suficiente de botellas de PET recicladas con tapa necesarias según diseño.
- III. El material de relleno debe ser previamente cernido para obtener un buen desempeño de la botella cuando esta es sometida a esfuerzos, ya que esto se logra manteniendo un mismo tamaño de granulometría y con ello se evita la formación de vacíos que resulten en la deformación del envase.
- IV. Cada una de las filas que se va construyendo con las botellas de PET debe ser colocada con una mezcla de mortero y debe nivelarse conforme se vaya ascendiendo.
- V. A medida que se van colocando las botellas se van amarrando por la cintura de la botella.
- VI. Las botellas deben llevar un amarre también en las tapas de las botellas, formando un amarre biométrico que brinde mayor estabilidad del muro.
- VII. Al llegar al primer tercio, se debe revisar el nivel y plomo de la hilada.
- VIII. Se rellenan los espacios entre ecoladrillos y se nivela de nuevo, hasta terminar el muro.

(ECOTEC Bi4PVS, n.d; Ruiz., *et al* 2012)

LADRILLOS DE PLÁSTICO RECICLADO

Los ladrillos de plástico son componentes de construcción (fig. 2.5) fabricados con el reciclado de este material, de esta manera se disminuye la contaminación a la par de que se reducen los costos de producción y construcción mediante el uso de los desechos sólidos que son recursos que se encuentran al alcance ya que pueden obtenerse *in situ*. (Gaggino, 2008, p. 137)



Figura 2.5. Ladrillos de plástico reciclado. Fuente: Tectonicablog. 2018.

El proceso de fabricación de los ladrillos como se muestra en la fig.2.6 consiste en mezclar el triturado de los plásticos con el cemento portland para que este actúe como aglomerante y de cohesión a la mezcla, se debe incorporar un aditivo químico para mejorar la adherencia de las partículas de plástico. La masa resultante se coloca en moldes y se deja fraguar como una masa de concreto ordinaria. (Prieto, 2018)



Figura 2.6. Diseño esquemático del proceso de fabricación del ladrillo a base de PET.

Fuente: Martínez y Cote, 2014

BENEFICIOS DE LOS LADRILLOS

Algunos de los beneficios que pueden ofrecer estos ladrillos según Gaggino (2008) son los siguientes:

- Estos elementos fomentan la autoconstrucción, gracias a que su fabricación es sencilla, no requiere de maquinarias caras y no necesita grandes instalaciones para procesarlo.
- Los ladrillos, bloques y placas elaborados con plásticos reciclados son livianos por el bajo peso específico de la materia prima.
- Los elementos obtenidos son malos conductores de calor por lo que tiene una buena aislación térmica.
- Tienen una menor resistencia a los de otros elementos constructivos tradicionales, pero es suficientes para ser utilizados como cerramientos de viviendas con estructura independiente antisísmica. En el caso de las placas la resistencia es similar a la de placas fabricadas con ladrillo común.
- La absorción de agua es similar a la de otros cerramientos tradicionales

- Según pruebas realizadas se demostró que tienen buena resistencia al intemperismo ya que al exponerse tres años a estas condiciones no se observó alteración dimensional ni deterioro del material, a la par se le realizó un ensayo de envejecimiento acelerado que fue alrededor de 25%.
- Tiene buena resistencia al fuego, con base a pruebas este material está clasificado como un material Clase RE2: Material combustible de muy baja propagación de llama.

(p. 137, 146-147)

MORTERO CON RESIDUOS DE PVC

Otra alternativa para reutilizar los desechos de plástico se ha aplicado en la elaboración de mortero por medio de la investigación realizada en la facultad de Ingeniería Civil en Cluj-Napoca, en donde se fabricó un mortero con arena, cemento, cal hidratada, agua y desechos plásticos, los resultados obtenidos demostraron que es posible usar desechos de PVC en la composición de este material (Fig. 2.7). Según la investigación realizada por Aciu C. la mejor proporción de materiales para hacer mortero fue cuando se reemplazó un máximo de 25% de arena por residuos plásticos, tomando como base la receta estándar para fabricar mortero. (Aciu, *et. al.*, 2018)



Figura 2.7. Sección de ruptura de especímenes rotos (ensayados). Modificado de Aciu C., et. al., 2018.

El mortero resultante puede utilizarse para pavimentar, dadas sus características físico-mecánicas, es decir, resistencia a la compresión y el coeficiente de absorción de

agua. Con este estudio también se demostró la posibilidad de desarrollar materiales de construcción ecológicos que no impliquen un alto consumo de energía y recuperar la energía incorporada de PVC reutilizado.(Aciu, *et. al.*, 2018)

CONCRETO TRANSLÚCIDO

El concreto translúcido (CT) es una innovación en materiales constructivos sustentables ya que como lo explican Ahuja y Mosalam (2017) está construido a partir de paneles de concreto que se fabrican con incrustación de fibra óptica para transmitir la luz solar (fig.2.8), cuya función soportar y proporcionar luz natural en el espacio interior de una habitación que normalmente se iluminaría artificialmente consiguiendo así un ahorro de energía. Además, la radiación solar, que consiste en todo el espectro de luz (ultravioleta, visible e infrarrojo) canalizada por fibras ópticas puede contribuir a calentar la habitación durante la temporada de invierno. (Hoyos, 2012, p. 19).



Figura 2.8. Muestra de concreto translúcido. Fuente: Askix

El concreto translúcido tiene características similares a las del concreto tradicional, como la resistencia en compresión. Sin embargo, la adición de fibra óptica tiene ventajas puesto que se reduce el peso del concreto y permite el paso de luz al igual que un elemento de

acristalamiento. A través de estudios realizados sobre el concreto translúcido se ha logrado obtener el porcentaje de fibra óptica que debe ser empleado a la mezcla de mortero, de acuerdo con Ahuja y Mosalam (2017) el uso de una menor densidad de fibra optimiza los costos de producción de paneles CT, ya que las fibras ópticas constituyen el componente más caro en toda la mezcla en términos de costos de materiales. El uso de baja densidad de fibra también genera menos regiones de concentración de tensión en el concreto que eventualmente podrían conducir a la fractura del panel de CT. Así también se debe tener en cuenta, que, si la densidad de fibra en los paneles es alta, la radiación solar provoca un recalentamiento excesivo y hace que las cargas de enfriamiento consuman una mayor parte de la energía del edificio. La relación apropiada es la que contiene un 6% en volumen de fibra óptica en el panel CT permitiendo un ahorro de energía lumínica de alrededor del 50%. (Hoyos, 2012, p. 19-20)

CONCRETO TRANSLÚCIDO FOTOCATALÍTICO CON VIDRIO

El profesor Bill Price es quien materializó la idea del concreto translúcido realizando pruebas que tendrían como finalidad encontrar materiales que permitan remplazar los agregados tradicionales por otros que posean la propiedad de translucidez como el vidrio y el plástico, así como también remplazar el conglomerante tradicional del concreto por otro que permita el paso de la luz. (Hoyos, 2012, p. 19). Lo que ha llevado a más investigaciones como la de Spiesz, *et. al.* quienes realizaron la incorporación de nuevos materiales al concreto translucido para su fabricación como vidrio reciclado y TiO_2 , permitiendo que con esta tecnología se aprovechen los residuos y se purifique el aire, convirtiéndolo en un material ideal para la construcción sustentable.

Los agregados de vidrio pueden remplazar los agregados pétreos en la creación del concreto, volviéndolo más estético (ver fig. 2.9). No obstante, el principal problema de ocupar residuos de vidrio como material para concreto es el efecto expansivo provocado por la reacción álcali-sílice debido a que el vidrio contiene sílice reactiva que reacciona al mezclarse con el agua y los álcalis del cemento, lo cual puede solucionarse empleando cementos bajos en álcali o puzolanas. (Spiesz, *et al.*, 2016, p. 437)

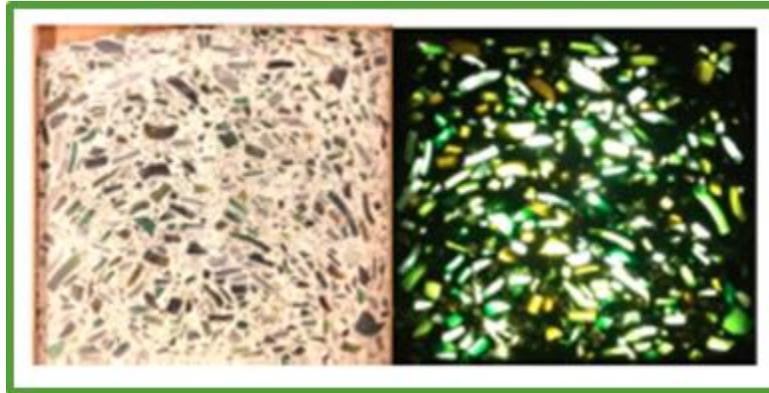


Figura 2.9. Placa de concreto translúcido. Modificado de Spiesz , et al. (2016)

El concreto translúcido con vidrio y TiO_2 es beneficioso por que logra la purificación del aire mediante oxidación fotocatalítica, la cual consiste en la destrucción de los contaminantes por medio del empleo de radiación solar ultravioleta y catalizadores con el objeto de formar radicales hidroxilos, los cuales posteriormente tendrán un efecto oxidante sobre los contaminantes químicos. En este proceso la oxidación tiene lugar directamente en la superficie de la partícula de TiO_2 que se utiliza como catalizador o semiconductor. (Garcés, *et. al.*, p. 84). Este proyecto se llevo a cabo en Hengelo y los resultados obtenidos fueron una reducción del 19% de la concentración de NO_x durante todo el día y hasta un 28% cuando se consideró solo las tardes, ya que, es en esta parte del día que la intensidad de luz ultra violeta es más alta. El empleo de estos dos materiales juntos se explica a que con esta combinación las partículas de TiO_2 se activan más eficientemente gracias a las propiedades de reflexión y transmisión de la luz del vidrio. (Spiesz., *et. al.*, 2016, p. 437)

Según el estudio realizado por Spiesz, *et. al.* estas son algunas observaciones y recomendaciones:

- La reacción álcali-sílice se puede suprimir en concreto con vidrio mediante adiciones de ceniza volante o escoria granulada de alto horno molida;
- La translucidez de las baldosas de concreto depende del tamaño máximo de partículas de vidrio y del espesor de las baldosas.
- Las partículas de vidrio expuestas contribuyen a una mejor activación del fotocatalizador de TiO_2 y a su vez a una mejor oxidación fotocatalítica que eficiente de los contaminantes del aire.

EMPLEO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PREPARACIÓN DEL CONCRETO

El concreto es uno de los materiales en la construcción que ha sido objeto de modificaciones para hacerlo un material más amigable con el ambiente, con este propósito se han hecho pruebas mostrando que el agua residual puede ser un recurso que se puede emplear en la fabricación de concreto hidráulico. El impacto que se logra con esto es importante, debido a que por un lado se reutiliza el agua y por el otro se ahorra el costo del tren de tratamiento necesario para potabilizarla. Esto se demostró por Saxena y Tembhurkar (2018) quienes elaboraron dos mezclas de concreto una con agua residual y otra con agua potable, posteriormente se compararon para evaluar el desempeño del concreto con agua residual en diferentes pruebas, que son las siguientes:

Consistencia Estándar

Este parámetro de calidad se midió con la profundidad de penetración del émbolo vicat en la pasta cementante. Dicha prueba establece que el agua requerida para lograr una consistencia estándar puede definirse como el agua necesaria para que la aguja del aparato Vicat penetre $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ durante 30 segundos en la pasta de cemento. En esta prueba la profundidad de penetración fue de entre 5 y 7 mm (ver figura 2.10) con lo cual se obtuvo una consistencia de 30% para el agua potable y 31.5% empleando agua residual. Lo que significa que se necesita un 30% de agua potable y un 31.5% de agua residual en peso de cemento seco para obtener una pasta de cemento de consistencia estándar. La diferencia de los resultados entre cada tipo de agua, demostró que el empleo de agua residual puede ser útil requiriendo un porcentaje ligeramente mayor que el agua potable, debido a la presencia de sólidos totales en exceso, sólidos disueltos y sólidos en suspensión que contiene el agua sucia, lo que reduce la relación agua / cemento.

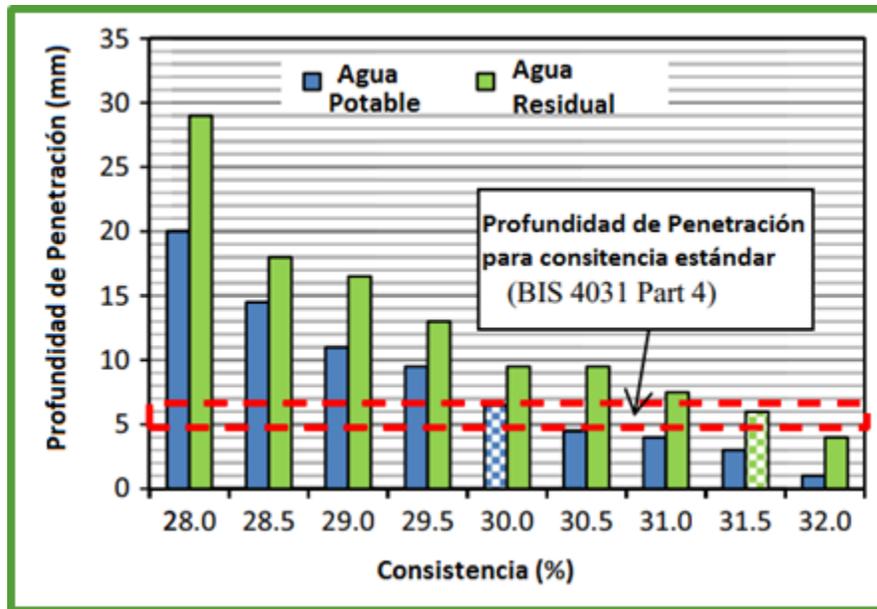


Figura 2.10. Estándar de consistencia en cemento con Agua residual. Saxena y Tembhurkar (2018)

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En este parámetro de medición los resultados obtenidos al ocupar agua residual en la elaboración de cemento mostraron una reducción de la resistencia a la compresión del 5.07% comparado con la resistencia del cemento con agua limpia. Esto se concluye se debe a la presencia de materia orgánica en las aguas residuales que puede interferir en la reacción de hidratación del cemento y, por lo tanto, este no pudo alcanzar su plena resistencia. Sin embargo el empleo de una mezcla con agua residual puede resultar factible en elementos estructurales cuya resistencia de diseño pueda cumplirse a pesar de tal disminución, de esta forma no exceder los esfuerzos permisibles de trabajo.

CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUA DE PLUVIAL.

Las casas ecológicas o viviendas sustentables a menudo cuentan con sistemas de captación y aprovechamiento de agua pluvial que se diseñan para capturar, transportar y almacenar agua de lluvia, que cae sobre una superficie donde puede ser recolectada y posteriormente ser almacenada para utilizarse como agua de riego o descarga para sanitarios. Aprovechar este recurso hídrico evita inundaciones y permite el ahorro del agua potable. (Zhang, 2018, p. 1341, Serrano, 2014, p. 26)

Existe conocimiento sobre una gran variedad de técnicas relacionadas con sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia (fig. 2.11) estas se pueden clasificar con base

en sus diferentes fuentes, tipo de escorrentía, técnicas de manipulación, tipo de almacenamiento y a los diferentes usos que se le da al recurso. (García,2012 p. 24)

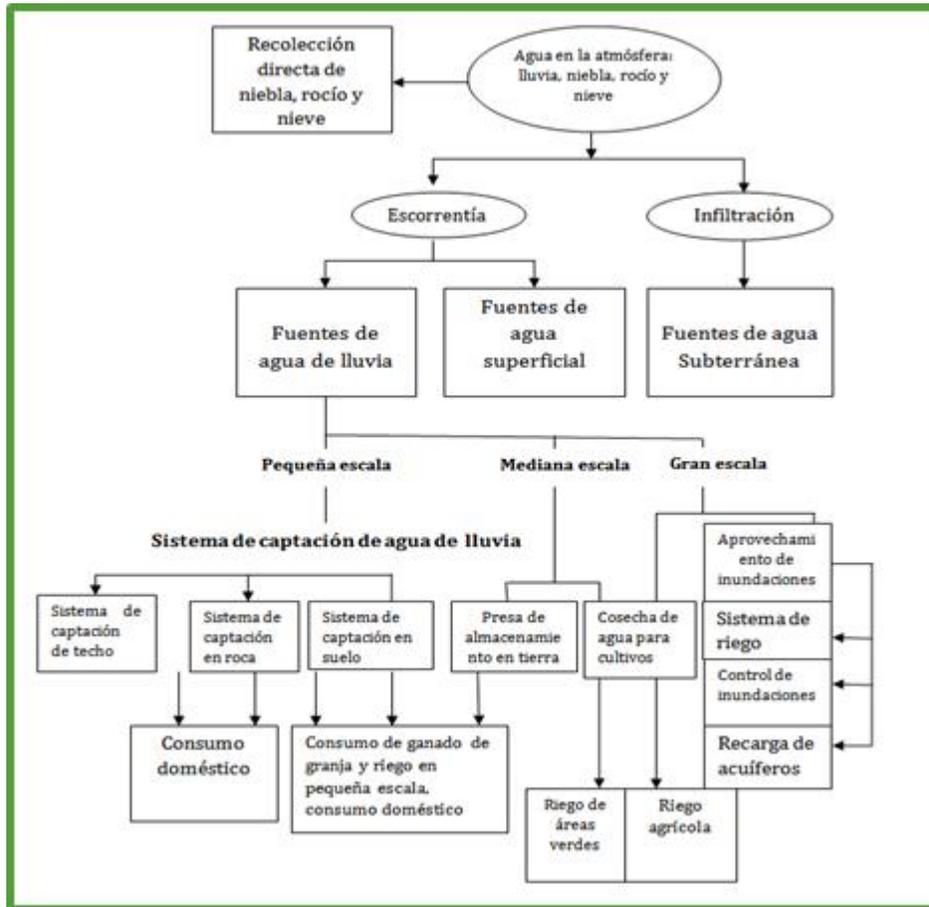


Figura 2.11. Clasificación general de los sistemas de agua de lluvia. Modificado de García. (2012)

En la figura 2.12 se puede observar como está diseñado un sistema de recolección de agua pluvial sencillo, el agua concentrada en el área de captación se transporta a un dispositivo de almacenamiento después de recibir algunas formas de pretratamiento (por ejemplo, filtración o desagüe de primera descarga) y cuando la capacidad de almacenamiento del sistema se utiliza, se produce un desbordamiento y se descarga al sistema de drenaje.

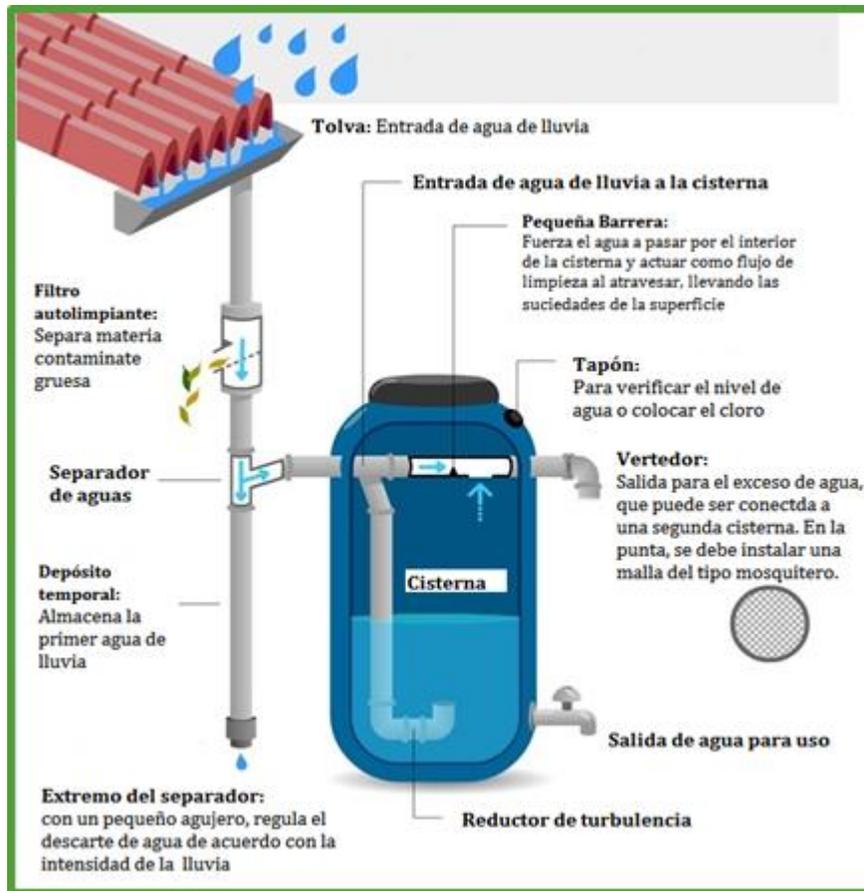


Figura 2.12. Sistema de captación de agua de lluvia. Modificado de blogdaengenharia.com

COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL

- **ÁREA DE CAPTACIÓN**

El área de captación de agua pluvial es la superficie de primer contacto del líquido previo a su almacenamiento, esta puede ser de material natural o artificial. Los materiales artificiales pueden tener ventajas, en este tipo se encuentran los techos de las láminas plásticas de policarbonato, que ofrecen más cantidad y mejor calidad del agua colectada que las de madera o palma. (García, 2012 p. 24). La recolección en superficies naturales se refiere a laderas, que suelen utilizarse en lugares de cultivo cuando el espacio del techo no es suficiente para obtener la cantidad de agua requerida para las actividades de reuso, en

este caso el aprovechamiento de una superficie natural requiere de impermeabilización. (Hernández, n.d, p.06-07).

- **SISTEMA DE CONDUCCIÓN**

Una vez determinada el área de captación se debe establecer el sistema de conducción, que se compone por elementos como canaletas y tuberías , cuya función es conducir el agua y hacer la bajada por medio de tubos de PVC hasta el sistema de almacenamiento. Las canaletas se instalan en los bordes más bajos del techo en donde el agua de lluvia tiende a acumularse antes de caer al suelo; el material debe ser liviano, resistente, fácil de unir entre sí y debe combinar con los acabados de las instalaciones. Se recomienda colocar mallas que detengan sólidos, para evitar la obstrucción del flujo (figura 2.13). Así mismo, se debe realizar en los techos limpieza al inicio de la época de lluvias. (Hernández, n.d, p. 9)

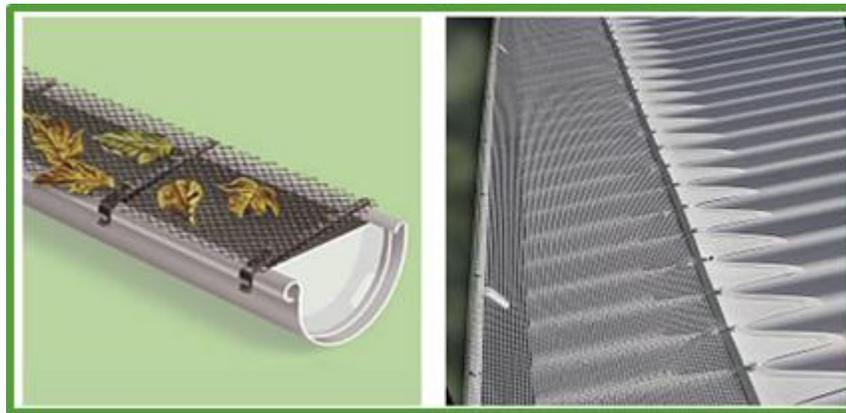


Figura 2.13. Canaletas con malla para evitar la contaminación por hojas. Fuente: Hernández F.

- **FILTRACIÓN**

En un sistema de captación de agua pluvial es necesario llevar a cabo un proceso de filtración para retirar materiales solidos como hojas, rocas y tierra que pudieran encontrarse en el techo en el momento de la lluvia, de esta manera evitar la contaminación del agua y la obstrucción en los tubos de conducción que pudiera ocasionar una ruptura por presión. Los componentes necesarios para un proceso óptimo de filtración son los siguientes:

- a) **Filtros para hojas y otros sólidos de gran tamaño.** Se encargan de retirar elementos de gran tamaño que puede arrastrar la lluvia.
- b) **Interceptores o separadores de primera lluvia.** Su objetivo es apartar la primera agua que escurre y arrastra una mayor concentración de contaminantes de la

atmósfera y partículas de la superficie de captación. Hay separadores de lluvia manuales y automáticos.

- c) **Filtros.** Ayudan a retener sólidos suspendidos y otros que no fueron retenidos en las etapas anteriores. También pueden reducir la contaminación microbiológica. Por ejemplo, como se muestra en la tabla 2.2 los filtros pueden clasificarse en las siguientes categorías.(García J.,2012 p. 27)

Por velocidad de filtrado	Según el medio Filtrante		Según el Flujo	Según la carga
Rápidos (240 -360 m ³ / m ² / día)	Arenas :	Cuarzo, sílice, Zeolita, antacitra, etc.	Ascendente	Gravedad
	Gravas:	Cuarzo, Tezontle, etc.	Descendente	
Lentos (0.1-2.5 m ³ / m ² / día)	Gravillas :	Cuarzo, Tezontle,Carbón activado etc.	Flujo Mixto	Presión

Tabla 2.2. Clasificación de filtros. Modificado de García J. (2012)

IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA

El agua contiene diversas sustancias químicas y biológicas disueltas o suspendidas en ella. Desde el momento que se condensa en forma de lluvia, el agua disuelve los componentes químicos de sus alrededores y corre sobre de superficies de las cuales obtiene otros. (Orellana, 2005, p.1). Por esta razón es que el agua pluvial puede contener bacterias o patógenos que los filtros no pueden retirar, por lo tanto, según sea su empleo, estará sujeta a estándares de calidad específicos con los cuales será evaluado. (Serrano, 2014, p. 26). Para determinar la calidad del agua existen parámetros medibles, de carácter físico, químico y biológico, que son turbidez, temperatura, olor, DBO, DQO, metales pesados, pH, alcalinidad, dureza, coliformes fecales, coliformes totales, oxígeno disuelto, NH₄, NO₃, nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos disueltos, etc. En el caso del agua de lluvia, las características que son de mayor interés es la medición de turbidez, color aparente, pH, conductividad, temperatura, nitratos, alcalinidad total, cloruros, aluminio, dureza total, hierro total, sulfatos y coliformes totales, teniendo en cuenta que se pretende un uso doméstico, pues según estudio realizado por Ospina y Ramírez (2014):

Se sugiere que el agua de lluvia sea de uso doméstico y no para consumo humano, debido a que se pueden hallar altas concentraciones de metales tales como Pb, Cd, Zn y Cu, derivadas de actividades antrópicas como de las condiciones naturales.

SISTEMAS DE NATURACION EN LA CAPTACION Y TRATAMIENTO DE AGUA PLUVIAL

De acuerdo con Prodanovic, *et. Al.* 2017:

Los muros y azoteas verdes pueden jugar un papel importante en el tema de captación de agua de lluvia ya que pueden funcionar a su vez como superficies de captación, conducción o de almacenamiento según las características que tenga el sistema. Por otro lado, también se caracterizan por su capacidad de filtración que se logra a través del paso del agua por el sustrato debido a que tienen la capacidad para remover ciertos contaminantes del agua de riego.

En la Figura 2.14 se muestra la tasa de eliminación de sólidos suspendidos totales, con sustratos como: perlita, roca para cultivo, vermiculita, arcilla expandida y arena de río. A partir de esta evaluación se mostró que la remoción de este contaminante fue consistentemente alta (aproximadamente del 90%) para medios de cultivos lentos, lo cual se atribuye a las diminutas dimensiones de poro que se traduce en un mayor tiempo de retención así también esto podría dar lugar a una adsorción de partículas, donde puede observarse que la roca para cultivo es la que muestra una mayor eficiencia.

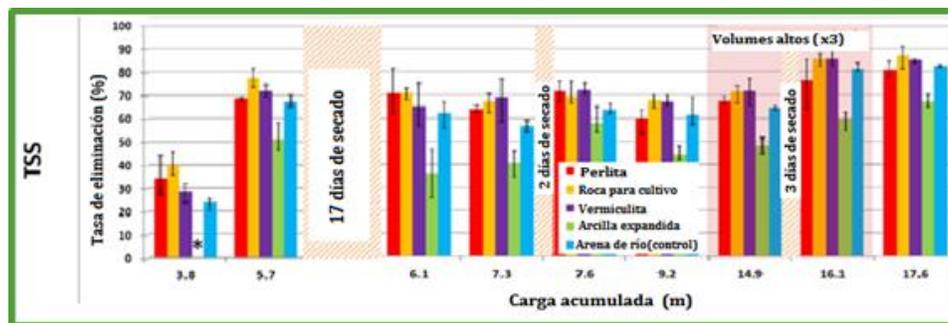


Figura 2.14. Remoción de Sólidos Suspendidos Totales. Modificado de Prodanovic, *et al.*, (2017)

En el caso del nitrógeno total (NT) las tasas de eliminación de columnas fueron en promedio, 50% y variaron entre 35 y 75% durante el período de dosificación, la tasa de eliminación de este parámetro se vio afectada negativamente por el secado, con el sustrato fibra de coco se observó que es el único en remover NT después del proceso de secado (17 días), en la figura 2.15 se muestra la tasa de eliminación de este parámetro:

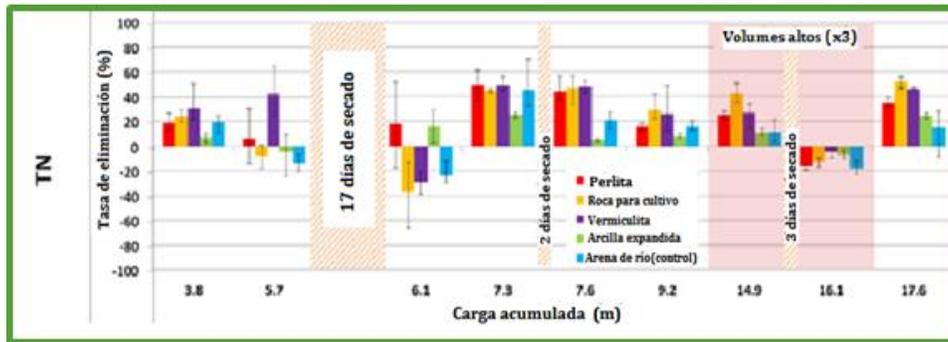


Figura 2.15. Remoción de Nitrógeno Total. Modificado de Prodanovic, et al., (2017)

En la siguiente gráfica puede observarse que la eliminación de fósforo total es superior en medios lentos (10-20%) mientras que en los medios rápidos se tuvo una remoción menor (10-20%) como puede interpretarse en la figura 2.16 que muestra la tasa de eliminación de fósforo total.

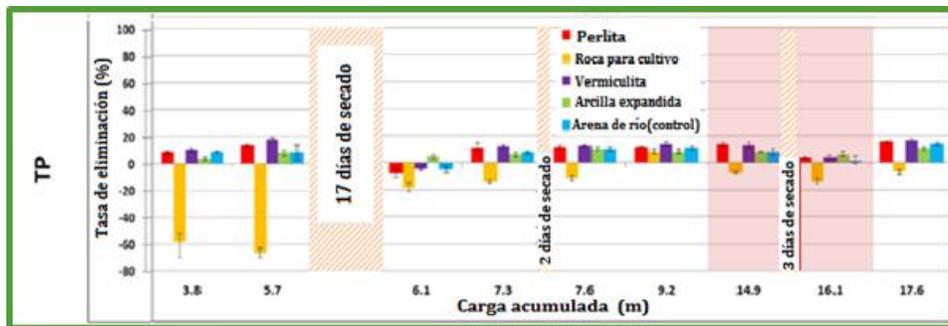


Figura 2.16. Remoción de Fósforo Total. Modificado de Prodanovic, et al., (2017)

Para el caso del parámetro de demanda química de oxígeno se observó un rendimiento donde las tasas de eliminación por medios lentos se mantuvieron estables a lo largo de todo el experimento con una remoción del 70% en los 3 medios. En el caso de los medios rápidos (perlita, vermiculita, piedra de crecimiento) se tuvo una ligera tendencia a la alza en su desempeño, además los períodos de secado no afectaron el desempeño de remoción de este contaminante. La DQO es debida a procesos tanto fisicoquímicos como biológicos que se ven impulsados por el tiempo de retención obteniendo una mayor retención. A continuación se muestra en la figura 2.17 la tasa de eliminación de la Demanda Química de Oxígeno.

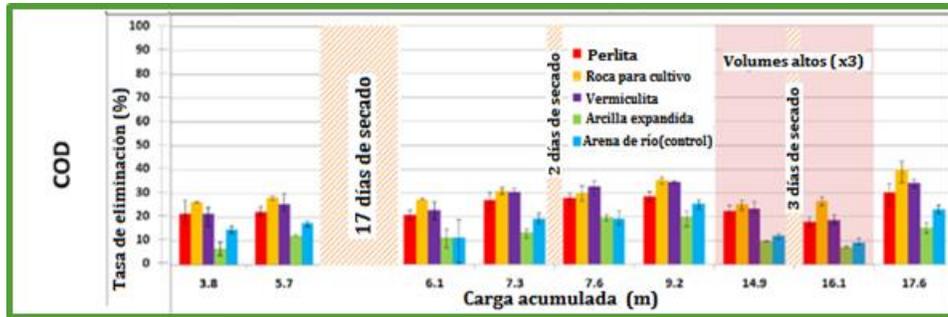


Figura 2.17. Remoción Demanda Química de Oxígeno. Modificado de Prodanovic V., et al. (2017)

Para este parámetro las tasas de remoción oscilaron entre 60 y 100% en el caso de medios lentos mientras que en el caso de los medios rápidos tuvo remociones positivas. En la Figura 2.18 se muestra la tasa de eliminación de *E. Coli.*, después del período de secado se obtuvo el peor rendimiento en la capacidad de remoción de cada uno de los medios a excepción de la piedra de lana. Además, se planteó la hipótesis de que a partir de la generación de biofilm maduro se puede obtener una inactivación eficaz de *E. coli.*

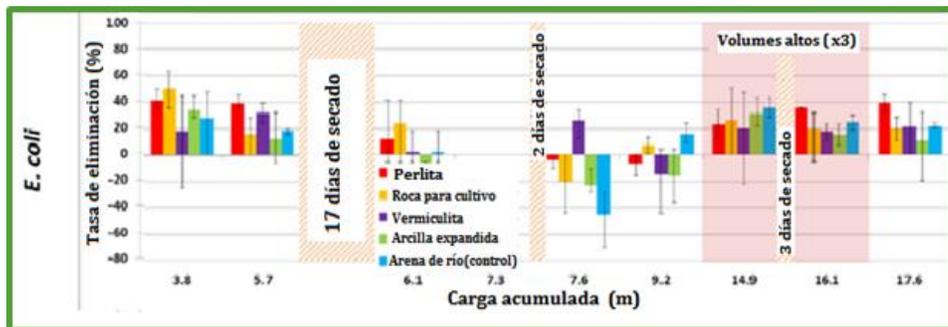


Figura 2.18. Remoción de *E. coli.* Modificado de Prodanovic, et al. , (2017)

En conclusión con base en los resultados del estudio la perlita y la fibra de coco son los materiales con mayores rangos de remoción de contaminantes. Además se puede deducir que el potencial de eliminación está dado por las propiedades de cada material y el tiempo de retención del agua.

(Prodanovic, et al., 2017 p. 629-632)

CAPÍTULO 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE AZOTEA Y MUROS VERDES EN UNA VIVIENDA ECOLÓGICA

El objetivo de llevar a cabo este proyecto es evaluar los procesos de elaboración para construir una vivienda ecológica, costos y así compararlos con las prácticas de construcción convencionales, con el propósito de determinar si es óptimo el uso de tecnologías y materiales ecológicos en el sector de la construcción. Se pretende también hacer las observaciones pertinentes para definir bajo qué condiciones es ideal implementarlos.

Para ello, se plantearon y discutieron algunas ideas que llevaron a la propuesta de varios prototipos que fueron modificándose con el paso del tiempo en función de las dificultades presentadas y necesidades de mejora, como se relata en los siguientes apartados.

DISEÑO DE PROTOTIPOS

En el comienzo de este proyecto de tesis se propusieron dos modelos, el primero un mecanismo de azotea verde y el segundo, un mecanismo de muro verde. Para mejorar el diseño debido al espacio con el que se contaba, se consideró juntar ambos mecanismos e instalarlos en una vivienda a escala, realizada como una construcción normal de concreto.

A modo de cumplir especificaciones técnicas particulares de este proyecto, se decidió reducir los volúmenes de concreto involucrados en elementos como traveses y columnas, surge la idea de elaborar un modelo en el que su estructura partiría de un esqueleto con perfiles PTR (figura 3.1) para reducir el espacio y minimizar el costo.

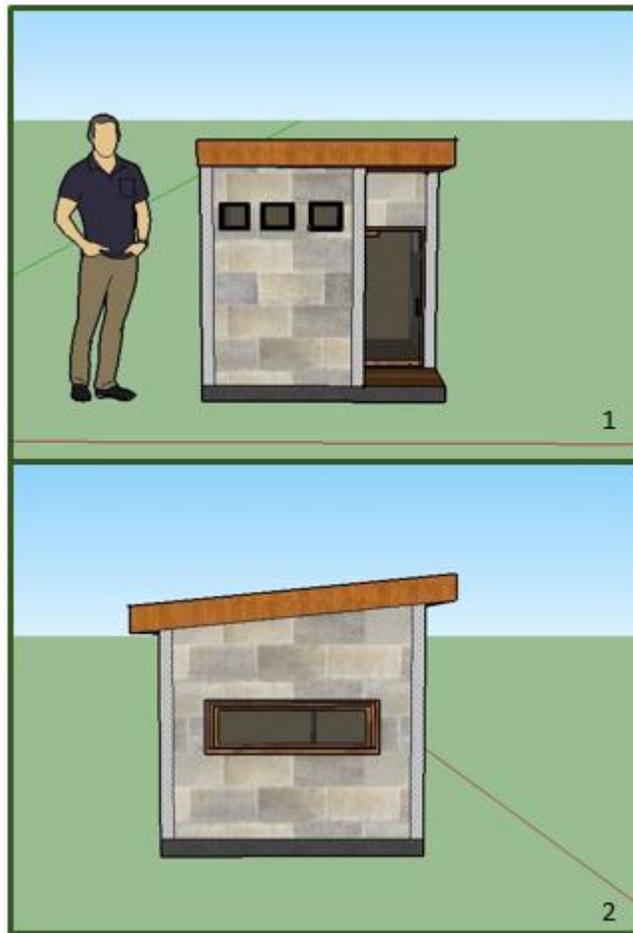


Figura 3.1 Primer prototipo de una casa escala.

Con base en el primer prototipo que se realizó se observó que al contar con una sola pendiente solo podría aprovecharse el agua de escorrentía que desbordaría sobre el muro colindante con el nivel más bajo de la azotea, por lo cual se cambió el diseño del techo aumentando el número parteaguas, de esta manera tener 4 superficies con su propio declive (figura 3.2) y 4 muros que por gravedad se regarían con la misma agua. La idea de este nuevo prototipo surge con el propósito de experimentar y evaluar algunos de los diferentes tipos de sistemas verdes, de tal modo que la configuración de cada uno de ellos estaría determinada por diferentes especies de plantas, mecanismo de soporte y el sustrato empleado. En cuanto al diseño de la vivienda se planteó sustituir los elementos estructurales tales como muros de concreto por otros que fueran de hileras de botellas de PET observando un potencial aprovechamiento de la luz natural y reducción de costos.

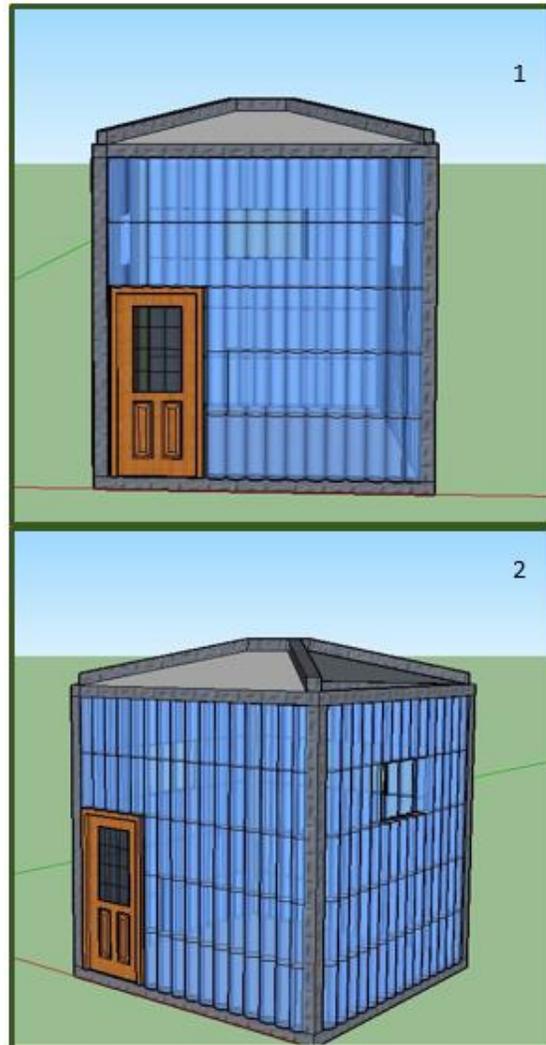


Figura 3.2. Segundo prototipo de vivienda a escala: 1) vista frontal, 2) vista lateral.

Para el prototipo final se decidió sustituir los perfiles PTR de la estructura por culmos de bambú con la finalidad de utilizar materiales más amigables con el ambiente y de origen natural. Otro mejoramiento del diseño final fue incorporar un relleno de arena a las botellas de PET como una manera de aumentar la capacidad de carga de los muros, debido a este cambio se propuso el suministro de luz instalando 2 traga luces orientados con la posición del sol.



Figura 3.3. Prototipo final vista suroeste.



Figura 3.4. Prototipo final vista noreste.

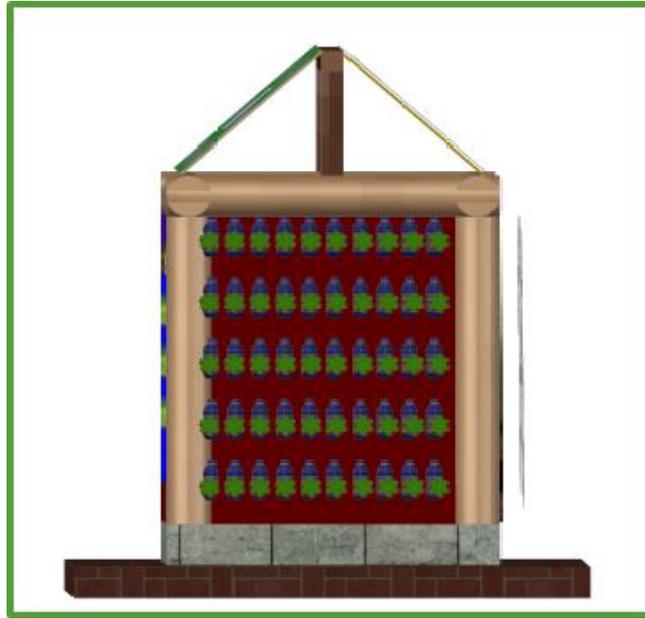


Figura 3.5. Prototipo final vista sur.



Figura 3.6. Prototipo final vista en planta.

BOTELLAS DE PET

En lugar de construir los muros de mortero y ladrillos de mampostería, se tomó la decisión de construir estos con ladrillos ecológicos. La justificación del empleo de este material está basada en la técnica mencionada en el capítulo anterior llamada ECOTEC Bi4PVS, basándonos en lo también descrito sobre las ventajas de reciclar el PET como medida en la mitigación del impacto ambiental al momento de reubicarlas de tiraderos a contenedores para su disposición. Considerando también que el aprovechamiento del material terroso del sitio disminuye el costo en comparación con la construcción de muros de mampostería.

ELECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE PET

En un comienzo se decidió recolectar botellas de diferentes tamaños y marcas para ser evaluadas con base a criterios como calidad del material y tamaño que encajará con el diseño planeado. La primera prueba fue de deformación, esta se realizó dándoles la misma cantidad de impactos con un mazo a cada una de las botellas para observar las alteraciones en su forma. Los resultados observados fueron los siguientes:

- El envase de las botellas de agua es de menor calidad que el de las de refresco, pues después de someterlas a los impactos presentaron una deformación inmediata.
- La botella con mayor resistencia a la deformación fue de la marca Coca-Cola de 1.5 Lts, pero debido a su espesor se descartó, ya que quedarían muros con un ancho sobrado, se necesitaría gran cantidad de arena para rellenarlas y debido al peso podrían pandearse.
- Después de las botellas de Coca-Cola, las botellas de refresco de 600 mL de otras marcas fueron las que tuvieron una resistencia admisible a la deformación, además son las que se encontraron en mayor cantidad.

Con base en los resultados se dio un seguimiento de la recolección limitándose a la búsqueda de botellas de refresco de 600 mL, esta labor se llevó a cabo dentro de la Facultad de Estudios superiores Aragón, donde la marca más abundante fue la de Coca-Cola. Una vez concluida la jornada de recolección, se realizaron tareas para acondicionar las botellas que fueron el retiro de la etiqueta, lavado y desinfección con agua y jabón con el fin de evitar malos olores así como prevenir infecciones al tener contacto directo con ellas.

MATERIAL DE RELLENO

En cuanto la cuestión del relleno de botellas se desarrollaron 2 propuestas, una a partir del relleno con arena y otra con material de escombros o cascajo, de las cuales se optó por la primera, porque el relleno a partir de arena proporciona una mayor resistencia en comparación con el relleno de cascajo, ya que este último requiere de un protocolo para su recolección, y un proceso de cribado más riguroso para alcanzar la granulometría adecuada y evitar espacios vacíos que limiten la resistencia del ladrillo ecológico.

PRUEBA DE LABORATORIO COMPRESIÓN SIMPLE

Con el objeto de conocer en qué posición las botellas proporcionan mayor resistencia al muro así también para determinar que amarre utilizar a partir del rendimiento observado se ensayaron en laboratorio de Ingeniería Civil, sometiendo estas a carga obteniéndose los resultados obtenidos en las siguientes graficas:

- Botellas ensayadas horizontalmente en grupos de 5.



Figura 3.7. Ensayo de compresión simple en botellas de PET (Peñafiel).

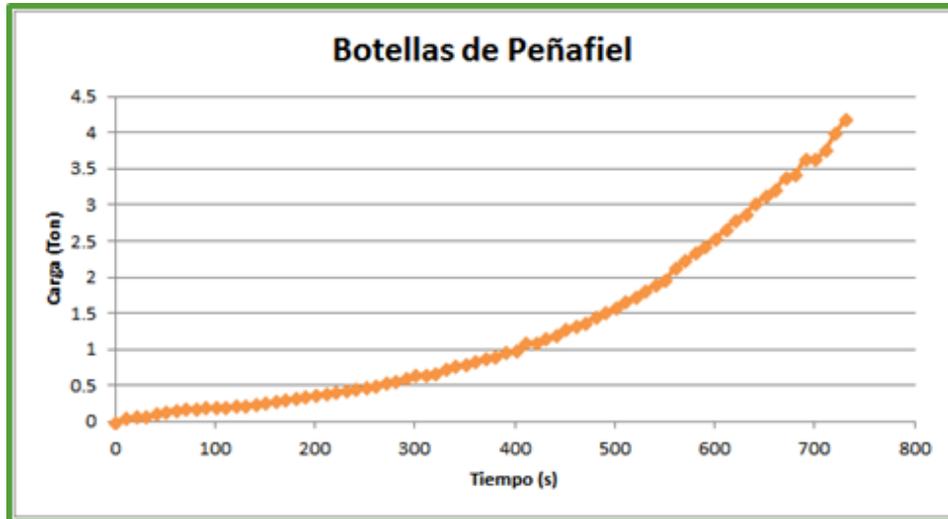


Figura 3.8. Gráfica Carga Vs Tiempo para botellas de refresco Peñafiel.

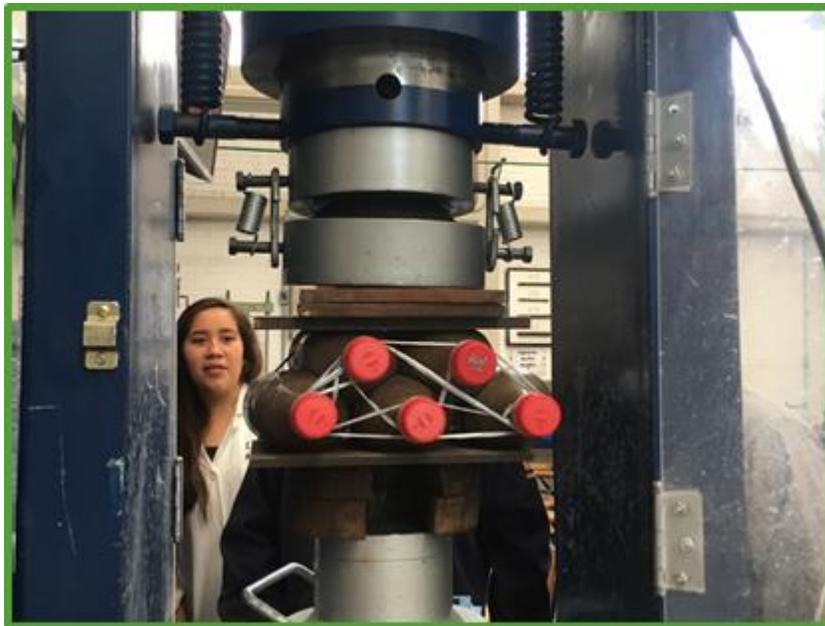


Figura 3.9. Ensayo de compresión simple en botellas de PET (Coca-Cola).

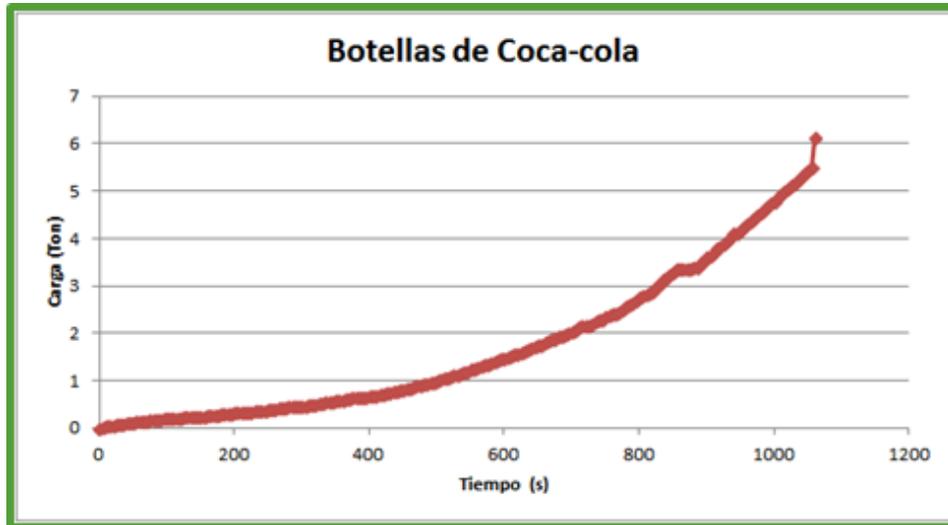


Figura 3.10 Gráfica Carga Vs Tiempo para botellas de refresco Coca-Cola

- Botellas ensayadas verticalmente de forma individual.



Figura 3.11. Ensayo de compresión simple en botella de PET.

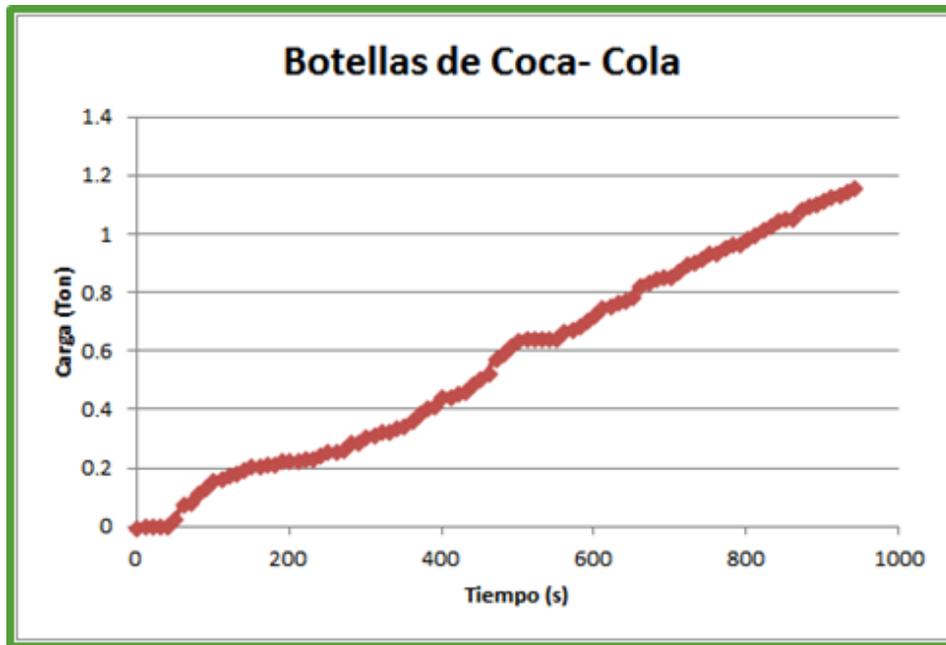


Figura 3.12. Resistencia a la compresión simple de botellas de Coca-Cola

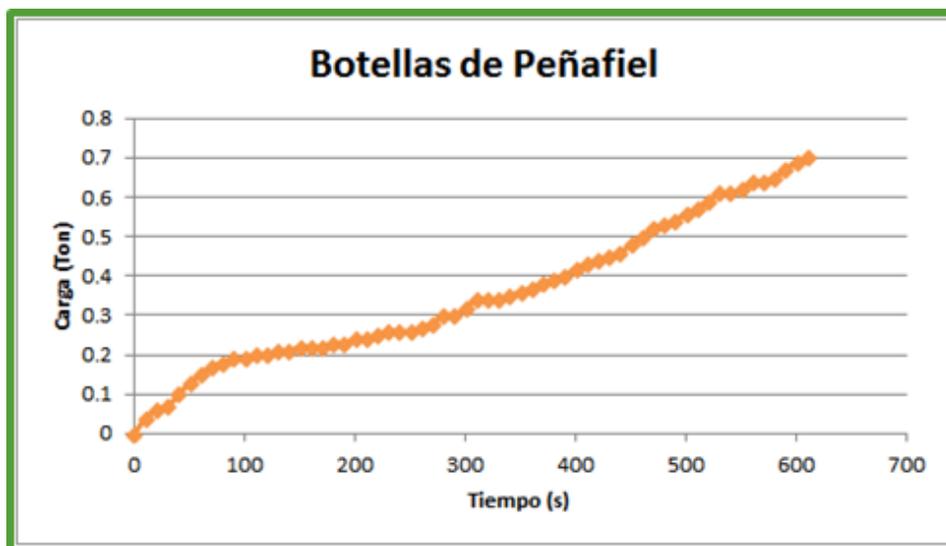


Figura 3.13. Resistencia a la compresión simple de botellas de Coca-Cola

A partir de estos resultados se determinó que la forma óptima de colocar las botellas para construir los muros es de manera horizontal, como información adicional las botellas de Coca-Cola tienen mayor resistencia que las de peñafiel. El conocimiento del rendimiento según los diferentes tipos de botella permitió decidir la colocación más adecuada de cada

botella, fue así que se colocaron estratégicamente las botellas de Coca-cola en las primeras hileras horizontales que son las que están sometidas a mayor presión, pero son las que poseen gran capacidad carga, así también fueron utilizadas las botellas de refresco de peñafiel en las hileras subsecuentes, mismas que están expuestas a un trabajo menor que las primeras. Por último, se utilizaron el resto de botellas de refresco de otras marcas en las hileras superiores ya que estas por ser las ultimas no están sometidas a gran compresión.

BAMBÚ

Para realizar la estructura esqueleto de la construcción se eligió usar bambú, por las propiedades que posee, como ya se mencionó en el capítulo anterior es un material de gran capacidad de carga e idóneo para proporcionar soporte debido a su gran resistencia y rigidez, además de ser un material ecológico. Encontrar este material no fue fácil ya que los distribuidores de bambú inmediatos eran aquellos de contacto electrónico, cuyos volúmenes de venta son por mayoreo. Después de una ardua labor de búsqueda se encontró un centro de distribución físico de bambú en el mercado de Jamaica de la ciudad de México, resultando conveniente por su cercanía a la zona de la construcción, así como un costo accesible del transporte del material, además por la venta a menudeo y buen precio, fue la opción más conveniente para comprar las piezas únicamente necesarias.



Figura 3.14. Maqueta estructura de bambú.

CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA ECOLÓGICA A ESCALA

ETAPA PRELIMINAR DE LA CONSTRUCCIÓN

Para dar comienzo a la construcción del proyecto se realizó un análisis de la zona para determinar el sitio idóneo en donde ubicar la vivienda, este lugar fue el que se consideró requería menor acarreo, limpieza y nivelación del terreno.

En las figuras 3.7 y 3.8 puede observarse el terreno elegido, siendo aquel con el menor accidenteamiento topográfico, del cual se hizo la limpieza para posteriormente hacer el trazo y nivelado.



Figura 3.15 Limpieza del terreno.



Figura 3.16 Terreno después de limpieza.

Para el proceso de delimitación del terreno se colocaron estacas en cada una de las esquinas, una de ellas se tomó como referencia para trazar con hilo un triángulo de 60 cm de un lado, 80 cm de otro y una hipotenusa de 100 cm partiendo del objetivo de formar un ángulo recto, pues con base a esta figura se asegura que todos los lados sean rectos. Posteriormente se realizaron los trabajos de nivelación, utilizando un manómetro de manguera con agua.



Figura 3.17. Nivelación del terreno con manómetro.

El relleno del terreno para nivelar se hizo con el producto del corte de un montículo de arena situado en los alrededores, para ello primero se cernió con una malla de fibras de polietileno para obtener una arena fina así obtener una superficie uniforme sobre la cual desplantar la cimentación. Principalmente el desarrollo de la nivelación se realizó para rellenar todas aquellas discontinuidades del suelo con potencial para producir fallas o asentamientos en condiciones de carga o servicio.



Figura 3.18. Nivelación del terreno.

En la etapa del diseño de la cimentación se pretendió utilizar un material reaprovechable que fuera cercano a los alrededores de la obra, con lo cual se realizó una labor de búsqueda encontrando restos materiales de construcción. De los materiales hallados se encontraron cilindros de concreto que se pensó podrían utilizarse por su capacidad resistente, sin embargo, las dimensiones de los cilindros imposibilitaron su empleo ya que su longitud de 30 cm iba a requerir de una excavación para fijarlos y dejarlos a nivel de desplante.

La segunda opción fue utilizar un número de adoquines reciclados que fueron donados por la universidad. Antes de utilizarlo se realizó una selección de estos para tener un control de las dimensiones y de esta manera conseguir una cimentación uniforme. Para fijar los adoquines se construyó una cadena de desplante en los bordes, al construirlo de esta manera se obliga a que la base trabaje como un solo elemento, evitando asentamientos diferenciales.



Figura 3.19. Colocación de la superficie de desplante con adoquín.

ELABORACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE BAMBÚ

La estructura de bambú fue construida según el diseño propuesto, este se compone de dos marcos horizontales de bambú y 4 culmos verticales en cada una de las esquinas del marco formando un cubo. Para ensamblar los elementos de este cubo, se formó uno de los marcos y se tomó como la base, realizando perforaciones cerca de los nodos, uniendo con espárragos (varillas roscadas) unos a otros. Este método de unión se eligió por la facilidad de ejecución, además de que los espárragos son un material idóneo de unión porque su galvanizado lo vuelve resistente a la corrosión.



Figura 3.20. Construcción marco de bambú base.

Lo siguiente fue unir con la misma técnica los culmos verticales con la base. Para finalizar el ensamblado del cuerpo de la estructura, se formó un segundo marco, que se colocó en la parte superior y se unió con el mismo método. El objetivo de formar dos anillos en la parte inferior como superior fue el proveer una cadena confinante, y con ello distribuir las cargas con los culmos para así disminuir la inducción de esfuerzos cortantes en los muros de carga.



Figura 3.21. Colocación del segundo marco de bambú.

Ya construida la estructura inicial, se procedió a elaborar la segunda, una estructura de culmos con forma piramidal construida como soporte del techo verde, primero se unieron los elementos diagonales con la estructura inicial para dar forma al parte aguas, dejando un espacio por los extremos superiores. Para apoyo de las diagonales sobre el cubo, se pensó colocar bases de triplay entre las uniones y así solucionar los problemas de montaje y unión debidos a la forma dada por los cortes en las secciones transversales del bambú, además de ampliar el área de distribución de esfuerzos. Subsecuentemente se construyó una estructura de madera, con la cual pudieran apoyarse los culmos con orientación en declive. Fue una vez montado por completo la superestructura que se procedió a elaborar un tratamiento simple de curado pretendiendo una protección de los efectos de intemperie, en particular contra la humedad. El tratamiento se baso en una limpieza y

acondicionamiento labrando cada elemento con una lija y después se protegieron con suficientes pasadas de barniz preservador.



Figura 3.22. Estructura de bambú.

MUROS CON LADRILLOS ECOLÓGICOS

Previamente a la construcción de los muros se elaboró una cadena de dalas para el desplante en la estructura de bambú con el objetivo de distribuir las cargas en una superficie de contacto mayor como también por la capacidad mayor en resistencia del concreto comparado con la del bambú, además de ayudar a la estructura a trabajar correctamente en casos de asentamientos evitando fallas o cuarteaduras como consecuencia. Para la mezcla de concreto hidráulico se tomó una dosificación respectiva con un $f'c = 100 \text{ kg/m}^2$ con base en el manual de CEMEX y se diseñó cada dala con la misma dimensión del ancho de muro. Para comenzar se puso una cimbra del triplay se sujetó con materiales encontrados en el lugar, después se realizó el colado de cada una de las dalas.



Figura 3.23. Construcción de cimbra para dala.

PRODUCCIÓN DE LADRILLOS

Para la elaboración de los Ecoladrillos se utilizaron las botellas recolectadas y previamente lavadas, se procedió a rellenarlas con arena añadiendo agua poco a poco con el fin de alcanzar el peso volumétrico seco máximo además de una mayor resistencia de los ladrillos. La compactación se realizó con varillas de $\frac{1}{2}$ "', agregando a la botella de PET arena con humedad óptima por capas y apisonándola de manera concéntrica como se hace en la prueba Próctor, hasta llegar al ras de la boquilla de la botella, verificando que quedara firme con el fin de asegurar la resistencia y menor deformación del ladrillo.



Figura 24. Producción de ladrillos.



Figura 3.25 Producción de ladrillos ecológicos.

RENDIMIENTO

La producción promedio diaria de ladrillos ecológicos por persona se estima de 10 botellas en jornadas de 4 horas contemplando únicamente tiempo de relleno y compactación simultáneamente. El rendimiento calculado fue de 113 ecoladrillos por m². En este proyecto en total se produjo 700 ladrillos en 70 días para 7m² de muro, la cantidad de días para culminar esta producción estará en función del número de trabajadores, del programa de obra ya que en medida que se realicen otros trabajos simultáneamente se prolongare el tiempo estimado Asumiendo que ya se ha realizado la labor de recolección de botellas y su limpieza. Debe considerarse en la estimación del rendimiento, que algunos de los ladrillos ecológicos pueden ser susceptibles de ser descartados por errores en el proceso de fabricación.

Cada botella de PET requiere alrededor de 1.114 kg de arena en promedio, siempre y cuando sean de las marcas Coca-cola, Peñafiel, Delaware, Senzao y Jarrito de 600 mL, así que para rellenar 700 ladrillos, se requieren cerca de 780 kg de arena. El costo de un costal de 50 kg de arena es de \$22 pesos por lo que el costo total en arena es de \$352, o bien, de \$2.6 pesos/botella.

COSNTRUCCIÓN DE MUROS ECOLOGICOS

La unión de los ladrillos ecológicos se hizo con mortero con una relación arena-cemento 2:1, lo cual resulto en un rendimiento de 0.15 m³ de mortero por m². Las botellas se montaron con las taparrosas orientadas hacia la fachada exterior, lo contrario a como suelen colocarse debido a que se buscó aprovechar la superficie que se genera para el montaje de las fachadas y muro verdes. Al edificar el muro sur, se observó la necesidad de emplear elementos de contrapeso debido a la deformación axial que se presentó. Una vez culminado el proceso de fraguado, se colocó rafia envolviendo cada uno de las secciones menores de las botellas (cuellos) cuya técnica es empleada para el trabajo conjunto de todos los elementos ante esfuerzos de tensión. Una vez construidos los muros, se realizaron los acabados exteriores, finalizando con detalles como el aplano de las paredes interiores, construcción de columnas en cada una de las esquinas y pintura marrón en cada muro.



Figura 3.26 Construcción de muros de PET.



3.27. Amarre de botellas.

ELABORACIÓN DE TECHO Y VENTANAS

Para la creación del techo se eligió ocupar como material madera para aligerar la bajada de cargas, además de poder manipular más fácilmente las dimensiones del techo y acoplarlo a la azotea verde. Se compraron dos tablas de triplay de 1.22 x 2.44 x 0.12 m, en la cual se trazaron las piezas para posteriormente cortarlas. Con el objetivo de proporcionar iluminación al interior de la casa, se instaló un tragaluz de acrílico en cada lado del techo que fue fijado con una cinta impermeabilizante que evitara filtraciones.



Figura 3.27. Construcción y montaje del techo.

La madera fue barnizada e impermeabilizada para evitar su deterioro. Como medida para ajustar el techo a la estructura de bambú se mandaron hacer piezas impresas en 3D a la medida.



Figura 3.28. Piezas de plástico usadas en la instalación del techo.

En la elaboración de ventanas se ocuparon pedazos de madera sobrantes del corte de polines empleados en los elementos estructurales, para hacer los marcos, así también se utilizó mica reciclada como vidrio, tornillos y tapas de refresco para los herrajes.



Figura 3.29. Ventanas de la casa ecológica.

SELECCIÓN DE PLANTAS

La vegetación seleccionada para este proyecto se eligió con base en algunos factores como facilidad de adquisición, las condiciones de florecimiento y por el color de sus flores. En la siguiente tabla se hace una breve descripción de las especies plantadas en los muros verdes, así como algunas recomendaciones de mantenimiento.

Especie	Descripción	Imagen
<p>PETUNIA (ATKINSIANA SURFINIA)</p>	<p>Su altura oscila entre los 30 y los 50 cm. Necesita riegos abundantes y diarios durante la floración, en primavera y sobre todo verano. Es importante no mojar las flores al regar y evitar hacerlo durante las horas más soleadas. En la época de floración es preciso abonar cada 15 días con un fertilizante rico en fósforo. No exige suelos demasiado fértiles, sino con buen drenaje. (Hogarmania, 2010, parr. 2 y3)</p>	 <p>Figura 3.42. Petunia. Hogarmania. (2010)</p>
<p>PLANTA DEL DINERO (PLECTRANTHUSVERTI CILLATUS)</p>	<p>Es una planta perennifolia con hojas opuestas, ovaladas y de un verde brillante. Debe situarse en zonas semisombreadas y puede vivir en el exterior siempre que la temperatura no descienda de los 18/20 °C. No resiste el frío. Durante la primavera y hasta el final del verano es conveniente añadirle un abono mineral con el riego cada 15 días. Los riegos serán más abundantes en verano y escasos en invierno. (consultaplantas, 2018, parr. 3-7)</p>	 <p>Figura 3.43. Planta del dinero. Consulta plantas. (2018)</p>

<p>PLECTRANTHUS (COLEO).</p>	<p>Es una planta de origen cultivada sobre todo en interior por su escasa tolerancia al frío, también es posible en exteriores donde el clima lo permite. De porte semiarbustivo, puede llegar hasta el metro de altura, aunque plantado en maceta no suele pasar de los cincuenta centímetros. Los cóleos no son exigentes con el suelo; un sustrato estándar y suelto para facilitar el drenaje. Prefieren un pH ligeramente ácido. Si las hojas no reciben la luminosidad suficiente se verán apagadas e incluso pueden llegar a caer. En verano hidrata con asiduidad pero con mesura cada vez. (Jose el jardinero, parr.1-10, 2018)</p>	 <p><i>Figura 3.47. Coleo. Jose el jardinero. (2018)</i></p>
<p>APTENIA CORDIFOLIA (ROCIO)</p>	<p>Planta rastrera que forma una alfombra de hierbas perennes de formación plana en grupos sobre el terreno a partir de una base. Los tallos pueden alcanzar unos 3 metros de largo. las hojas de color verde brillante, carnosas, tienen generalmente forma de corazón de unos 3 centímetros de largo o más. esta planta florece en primavera y verano. en cuanto a riego, su necesidad es frecuente (3-4 por semana), es muy resistente a la sequía. Además, en muros verdes, tapiza hacia abajo de donde es plantada, ofreciendo un agradable color verde al muro</p>	 <p><i>Figura 3.48. Rocio. Generación verde. (2014)</i></p>
<p>BIGNONIA CAPREOLATA (BIGNONIA)</p>	<p>De la familia: bignoniaceae (bignoniáceas), su origen es del sudeste de estados unidos. Es una planta trepadora siempre verde, aunque puede perder el follaje en parte a causa del frío, trepa mediante hojas transformadas en zarcillos y alcanza más de 8 m de altura en cultivo. Tienen flores en forma de embudo de 4-5 cm, color rojo anaranjado por fuera y amarillo en lóbulos, de primavera a verano. Sus necesidades de luz son de sol o media y puede resistir temperaturas de hasta -10°C, tolera amplia variedad de condiciones, incluyendo condiciones costeras. Prefieren un suelo bien drenado, rico en materia orgánica y soleada. (infojardin, 2017, parr.1)</p>	 <p><i>Bignonia. Infojardin. (2017)</i></p>

Tabla 1.2. Especies utilizadas en la vivienda ecológica.

Como se mencionó en el capítulo uno, los sistemas verdes pueden estar constituidos de muros vivientes, fachadas y azoteas verdes. Con el fin de ejemplificar un sistema verde, se instalaron en la casa ecológica una fachada del tipo indirecto y dos paredes vivientes, así como una azotea verde extensiva.

PARED VIVIENTE CON SISTEMA HIDROPÓNICO

La metodología existente indica que para la creación de sistemas de naturación deben definirse primero los elementos que lo constituyen como el medio de soporte, en este caso particular se tuvo la idea de evitar estructuras metálicas aprovechando las características naturales de la geometría del PET para la sujeción de un panel modular elaborado con geotextil en la creación de una pared viviente (Living Wall) con sistema hidropónico. El panel está integrado por 32 pequeños sacos de 15X10 cm y tiene la forma del muro como se ve en la figura 3. 30.



Figura 3.30 Geotextil como medio de soporte de un muro viviente.

Para sujetar el panel de geotextil a las botellas se plantearon dos alternativas, en la primera se contempló hacer cintos con la misma tela y coserlos en los bordes y mediante ellos hacer los amarres, esta idea, aunque aprovechaba el empleo del mismo material se descartó pensando que el panel estando en servicio proveería de esfuerzos que los cintos no serían capaces de soportar provocando el desplome del muro verde. La segunda alternativa consistió en colocar ojillos metálicos distribuidos en varios puntos del panel y fue la que se aplicó por la geometría de estos accesorios, de esta manera se alivian los esfuerzos producidos por el peso propio del sustrato contenidos distribuyéndolos en toda la circunferencia de cada ojillo. Para hacer el amarre a las botellas se ocuparon cinchos de plástico que se eligieron por la facilidad de ajustar el amarre evitando nudos tensores que produzcan el corte del geotextil.

Cada saco se relleno con sustrato de la marca PROMIX, el cual es una mezcla multiusos a base de turba de perlita, vermiculita y macronutrientes, con pH ajustado y agente humectante, que apoya con una buena retención de agua y un excelente drenaje que permite un buen desarrollo de las raíces.

En cuanto a la vegetación, y con base en lo expuesto sobre el tema en el capítulo uno, se eligieron las especies *Petunia (Atkinsiana Surfinia)* y Planta del dinero (*Plectranthus verticillatus*), las cuales soportan largos períodos de sol, son resistentes a plagas y requieren de moderado o poco riego, también son del tipo colgante, por lo que en un futuro cubrirán el geotextil.



Figura 3.31. Petunia y planta del dinero.



Figura 3.32. Muro viviente en la fachada oriente de la casa ecológica.

FACHADA VERDE INDIRECTA CON REJA DE PVC

Recordando que las fachadas verdes *indirectas* o fachadas verdes de doble faz incluyen una estructura de soporte vertical para el desarrollo de plantas trepadoras, se instaló una reja de PVC, la cual se cortó a la forma del muro.

Para colocar la reja se cortó un tubo de PVC de 25 mm que fue ocupado como soporte, también para dejar un espacio que limitara el contacto de la humedad proveniente de las plantas, con el muro. Al mismo tiempo, esta separación propicia la ventilación de la pared con las corrientes de aire natural. Para unir los segmentos de tubo de PVC se emplearon accesorios hidráulicos, que permitieron aprovechar la estructura de tubos como sistema de conducción del agua de captación a las macetas, para que este diseño fuera factible se propuso una configuración tal que proveyera la pendiente al tubo de irrigación que fue perforado con orificios que se colocaron a una distancia que fue reduciéndose a medida que se tenía proximidad con el punto donde termina la conducción, con el objetivo de regar en la misma proporción de agua a cada maceta. Cabe mencionar que se utilizó la menor cantidad de accesorios que fue posible para tener menor pérdida de la carga hidráulica. (ver figura 3.26).



Figura 3.33. Elaboración de soporte para pared indirecta.

Para este sistema de vegetación vertical se elaboraron macetas reutilizando porrones de 10L de agua, los cuales fueron cortados, perforados y pintados de negro con la finalidad de

proteger las raíces de las plantas del paso de la luz, también se dibujó sobre los porrones para darles estética.



Figura 3.34. Elaboración de macetas con porrones reciclados.

En cada maceta se sembraron dos plantas de las especies *Thunbergia alata* conocida como susana de ojos negros y *Bignonia capreolata* conocida como Bignonia, ambas del tipo trepador con flores anaranjadas que pueden permanecer expuestas a largos períodos de sol. Como sustrato se elaboró una mezcla entre tierra, un fertilizante conocido como PROMIX, y por debajo se colocó tezontle negro como capa filtrante para evitar la pérdida de tierra y fertilizante.



Figura 3.35. Susana de ojos negros y bignonia.



Figura 3.36. Fachada Indirecta con reja.

MURO VIVIENTE CON SISTEMA SUELO-CELDA

Los sistemas de suelo-celda cultivan plantas en el suelo compartimentadas en celdas individuales, que se agrupan en paneles que se unen a un marco. Son esencialmente una colección de plantas "en macetas", las celdas de suelo individuales están sujetas a los mismos desafíos que enfrentan la mayoría de las plantas en macetas comunes: la compactación del suelo, el estrés climático y la reposición de nutrientes del suelo. Pero las paredes exteriores de las celdas- suelo también enfrentan el problema de la pérdida de suelo debido a la erosión provocada por el viento y el agua.

Para ejemplificar este sistema, la celda se fabricó con botellas de agua de PET de 1 y 1.5 L a las cuales se les hizo un orificio en su parte media y en el fondo de la botella. La parte inferior de la celda, es decir, lo que correspondería a la parte superior de la botella, se pintó de color

negro pues es en esta sección donde se deposita el sustrato y la vegetación, y así se protege a las raíces de la radiación solar.

La unión entre celdas se hizo mediante el orificio en la base de la botella incrustando en el espacio otra del lado del taparroasca, la cual se perforó y colocó sobre ella una porción de esponja. La función de este sistema es que el agua de riego pase por cada una de las botellas de la fila y la esponja funcione como un filtro evitando que el sustrato se deslave.



Figura 3.37. Ensamble de celdas para el muro viviente

En la parte final de cada hilera, se colocó una botella de 250 mL que captará el agua filtrada a través de la columna, de este modo se puede almacenar agua para regar nuevamente o bien para poder realizar una caracterización de la misma si así se requiere.

Una vez más, se aprovechó la morfología del muro ecológico, para que por medio de cinchos de plástico se llevará a cabo la colocación de cada columna de celdas hasta cubrirlo en su totalidad como se aprecia en la figura 3.31.

Se instaló de forma alternada una hilera de botellas de 1 L y una hilera de botellas de 1.5L para crear un efecto visual de onda, el cual se complementó con la colocación de plantas de las especies *Durante repens aurea* conocida como duranta (de color verde) y *Plectranthus scutellarioides* conocida como coleo (de color rojo). Ambas especies son muy utilizadas en las áreas verdes públicas por su fácil adaptación y resistencia. Se utilizó el mismo sustrato que para la pared con sistema hidropónico.



Figura 3.38. Pared viviente con sistema suelo-celda.

TECHO VERDE EXTENSIVO

Tomando en consideración los componentes de un sistema extensivo, se colocó un mecanismo de capas sobre el techo de madera comenzando por una capa de recubrimiento que funciona como impermeabilizante y está hecha de pintura PRIMER, seguida de una membrana de reciclaje que funciona como capa drenante, para la cual se utilizó una lona; como barrera anti raíces se hizo uso del sobrante de geotextil. Como sustrato se colocaron 5 cm de espesor de tepojal (espuma volcánica) que fue elegido por su bajo peso volumétrico y por su color blanco que permite reflejar la luz buscando disminuir las tensiones térmicas. Finalmente se colocó una capa de 10 cm de tierra del sitio donde fueron halladas las plantas que brindara las mismas condiciones para su adaptación en el techo.



Figura 3.40. Capa filtrante de tepojal.

Para el caso particular de la naturación horizontal se recolectó de los alrededores de la facultad donde se construyó la vivienda ecológica, una planta conocida como “rocío” (figura 3.33). La razón de su empleo se basó en las características de la planta como la que tiene resistencia a los altos índices de salinidad del suelo y a las condiciones climáticas del lugar como radiación solar directa.



Figura 3.39 . Sesuvium portulacastrum (rocío).



Figura 3.41. Azotea verde extensiva.

COSTO DE MATERIALES PARA LOS SISTEMAS VERDES.

En la tabla 1.1 se muestran los costos de los distintos materiales utilizados en cada uno de los sistemas verdes que componen la construcción.

COSTO DE MATERIALES		COMPRA		UTILIZADO	
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	CANTIDAD	PRECIO
Geotextil	m ²	2.00	\$100.00	1.95	\$97.50
PRO- MIX	L	56.00	\$560.00	28.00	\$280.00
Reja de PVC	m ²	2.00	\$780.00	1.83	\$713.70
Grava	Bote	2.00	\$23.00	2.00	\$23.00

Tabla 1.1 Costo de materiales.

COMPORTAMIENTO DE LA VEGETACIÓN

- Pared Viviente Continua. El trasplante se elaboró en el invierno del 2018. Se colocaron Petunias, que aunque en un principio marchitaron sus flores, lograron prosperar. La segunda especie colocada, fue la planta del dinero, esta no presento problema alguno puesto que se adaptaron rápidamente.
- Pared Viviente Modular. Se trasplantaron durantas, que al igual que todas las plantas, permanecieron de 2 -3 semanas en maceta desde su llegada al sitio de instalación, en este periodo mostraron sensibilidad a las heladas de la época como por la falta de agua. Sin embargo, una vez instaladas florecieron nuevamente. Se trasplanto una segunda especie de Coleos, estas se caracterizaron por no presentar marchitamiento de sus hojas o muerte a pesar de la helada y el bajo riego.
- Fachada Indirecta. En ellas se instalaron susanas que fueron afectadas por el periodo de helada y por falta de agua. También se trasplantaron Bignonias que a pesar de perder follaje por la helada, florecieron en la primera semana después de su colocación.
- Azotea Verde Extensiva. Se colocaron varias plantas de la especie roció y algunas de estas murieron. Aun que una vez adaptadas las que vivieron, crecieron rápidamente. A pesar de la helada, se piensa que la muerte de algunas fue debido al trasplante.

RECOMENDACIONES

MANEJO DE BAMBÚ

- Para el caso del bambú se observó que es importante darle un tratamiento inmediato en cuanto este se adquiera, principalmente al tratarse de un bambú joven (verde) debido a que tiene una mayor tendencia a fisurarse, deteriorarse por exposición al sol y pudrirse con la humedad (lluvia). Una alternativa eficaz y poco costosa es lijar el bambú retirando la capa verde, necesario para una mejor adherencia entre el bambú y el aditivo (barniz), se recomienda emplear un baño con este material y una vez seco emplear un segundo baño de barniz. Con este tratamiento se provee una mejor estética, cuando se pretende proveer una resistencia mayor, es necesario un tratamiento más riguroso que incluye calentar el bambú y otros procesos.

- Si el bambú desempeña una función estructural (transmisión de cargas) , es importante evitar que soporte de manera autónoma el peso ya que esto incrementa la tendencia a fisurar o rajar los elementos, para esto, como medida preventiva se sugiere el apoyo de los elementos (bambú) sobre muros, polines o cualquier elemento que alivie la bajada de cargas.

MANEJO DE LOS LADRILLOS ECOLÓGICOS

- Es importante una selección del PET, desechando aquellas botellas que presentan deformación debido a que después de algunos días de rellenarse pierden rigidez.
- Para alcanzar un grado de compactación suficiente pueden emplearse barras de metal, que son eficaces puesto que no se deforman. Se recomienda se golpee al menos 20 veces de forma concéntrica (del exterior al centro) o hasta que se alcance la compactación suficiente.
- El empleo de agua sin control puede ocasionar una textura plástica y por tanto un peso volumétrico que no es el máximo, por lo que resulta importante emplear de manera gradual el agua y obtener el grado de humedad óptimo.
- Debido a que el mortero es un material empleado con fines de aglutinamiento de los ladrillos ecológicos (PET relleno de arena), no requiere un alto índice de resistencia, por lo que se puede optimizar (ahorrar) la cantidad de cemento, seleccionando una relación arena-cemento 2:1.
- Debido a la geometría de los ladrillos ecológicos (sección redonda) estos tienden a rotar, provocando tensiones en los muros que constituyen, es por ello que resulta importante el amarre de cada uno de los ladrillos, se recomienda utilizar rafia y elaborar amarres en zigzag (como se muestra en el capítulo 2) en cada una de las filas de modo que existan amarres que formen traslapes.
- Además, es importante montar el muro con ladrillos ecológicos sobre una superficie (regular) de apoyo.
- Puesto que el levantamiento de muros es una práctica diferente a la construcción con concreto, el comportamiento de fraguado es diferente, por esta razón los muros construidos con ladrillos ecológicos tienden a tener deformaciones en varios

sentidos (axial, transversal, etc.) Una solución es el uso de cimbras empujadas por contrapesos (empuje pasivo).

- Se puede emplear un acomodo inteligente del PET colocando las botellas de mayor resistencia en la parte inferior ya que las primeras hileras son las que están sometidas a mayor presión y emplear hileras con PET de menor resistencia conforme se ascienda de hilera.
- La geometría de las botellas puede usarse a favor de la instalación de sistemas de soporte cuando se colocan con la boquilla hacia el exterior, pudiéndose emplear como anclaje para el sistema de naturación.

SISTEMAS DE NATURACIÓN

- Se puede emplear PET como medio de soporte del sustrato y vegetación, además pintarlo de color negro evita la generación de algas. Colocar esponjas como medio filtrante es una alternativa de bajo costo para aminorar la dilución del sustrato cuando drena el agua de un soporte a otro.
- Cuando se emplean sistemas de naturación en serie (medios de soporte interconectados) con diseños que incluyen más de una especie, es importante empatar las características de estas, específicamente el requerimiento de agua debido a la dependencia entre una planta y otra por su interconexión drenaje-riego, con esto evitar la sobresaturación o baja irrigación en plantas que demandan una mayor necesidad de riego.
- Debido a que los sistemas de naturación necesitan un mantenimiento en el mediano y largo plazo, resulta importante la selección de especies que no sean difíciles de adquirir para su posterior remplazo.
- El empleo de plantas que crecen adyacentes al sitio de construcción permite el ahorro del costo de la vegetación, aporta un mayor beneficio puesto que ya tienen un crecimiento y están adaptadas a las condiciones del lugar.
- En este caso, como se empleó una especie de sitio para el techo verde, puede ahorrarse el sustrato ya que se puede emplear el material terroso del sitio.

CONCLUSIONES

Con base en el proceso constructivo se evaluó la facilidad para incorporar muros y azoteas verdes en viviendas, para ello en este proyecto se trató de optimizar los recursos para que el costo fuera el menor posible, bajo este enfoque se utilizaron materiales reaprovechables para construir la estructura de soporte de vegetación de la pared viviente modular en serie, otra labor encaminada al desarrollo sustentable fue la de ocupar la vegetación presente en las cercanías del sitio de trabajo, igualmente se aprovechó el material terroso de sitio como sustrato para la azotea verde. Se logró reducir en parte los costos a través del reciclaje, no obstante, algunos gastos ineludibles fueron la compra de materiales para elaborar las estructuras del resto de los sistemas de vegetación vertical como el muro viviente continuo y la fachada verde indirecta. Es pertinente mencionar que los materiales ocupados para dichos sistemas tienen un costo considerable al igual que los costos por materiales que se necesitan para sujetarlos en la pared. Igualmente, el gasto de las especies de plantas que se requirieron para cada uno de los muros verdes sumo un costo importante en el monto total.

La construcción de los sistemas verdes no resulta compleja a escala menor, en medida que vaya aumentando el área de la superficie a recubrir se requiere más requerimientos técnicos para que el muro soporte las cargas derivadas del sistema de naturación y el sistema de riego. También debe considerarse que a mayor escala debe incluirse a personal capacitado para su elaboración.

Pese a el costo que conlleva la instalación de sistemas de muros y azoteas verdes, los beneficios que pueden darnos son una gran inversión que reeditúa desde el corto hasta el largo plazo, las condiciones del entorno donde fue construida la vivienda ecológica era un calor extremo a falta de edificación en los alrededores aunado a la salinidad del suelo que incrementa la radiación solar por efecto de reflexión solar característico. Por lo que al aplicar esta tecnología se vio un cambio significativo en la temperatura percibida dentro y fuera de la vivienda generando un microclima, de la misma manera se agregó valor estético tanto a la construcción como al lugar. Si esto puede lograrse en una pequeña vivienda, el llevarlo a gran escala en mayor cantidad de inmuebles significaría un gran impacto en la reducción de las malas condiciones ambientales que vivimos.

Para que los sistemas de muros y azoteas verdes tengan un funcionamiento óptimo en el sentido ambiental y económico, se debe analizar el objetivo principal de uso, por ejemplo, si se requiere para ahorro energético, si quiere para captar agua de lluvia, tratar aguas

grises o simplemente para mejorar la estética del inmueble. Según los beneficios pretendidos es como se evalúan las características estructurales del inmueble y el presupuesto necesario para lograrlos. Poniendo un ejemplo si lo que se desea es lograr una reducción térmica en el interior podría considerarse colocar un muro verde en la fachada donde exista más radiación solar durante mayor tiempo en el día.

El uso de ladrillos ecológicos no es costoso si lo comparamos con la metodología común de construcción con bloques, el inconveniente es la cantidad de personas necesarias para hacer el relleno de las botellas en un tiempo menor

. Otro factor es que no existen normas que regularicen la técnica ECOTEC Bi4PVS por lo que es más probable que existan fallas en el comportamiento de la vivienda.

Se puede concluir que la incorporación de tecnologías y materiales ecológicos en la construcción son una alternativa viable para disminuir los contaminantes que genera la industria al medio ambiente, puede reducir costos de materiales y mejorar el entorno visual, beneficiar socialmente brindando una mejor calidad de vida en los sectores más vulnerables del país y del mundo.

REFERENCIAS

- Aciu C., Ilutiu D., Manea D., Orban Y. & Babota F. (2017) Recycling of plastic waste in the composition of ecological mortars. *Procedia Manufacturing* 22 .274–279
- Ahuja A. y Mosalam K. (2017). Evaluating energy consumption saving from translucent concrete building envelope. *Energy and Buildings* 153. 448–460
- Alexandria E. y Jones P. (2008) Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43. 480–493
- Asgarzadeh M.,Vahdati K., Lotfi M., Arab M., Babael A., Naderi F., Soufi M. & Rouhani F. Plant selection method for urban landscapes of semi-arid cities (a case study of Tehran). *Urban Forestry & Urban Greening* 13. 450–458.
- Azkorra Z., Pérez G., Coma J., Cabeza L., Bures S., Álvaro J. , Erkoreka A., Urrestarazu M. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Applied Acoustics* 89. 46–56
- Besir a., Cuce E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82. 915–939.
- Bianchini F, Hewage K. (2012). How “green” are the green roofs? Life cycle analysis of green roof materials. *Build Environ* 48. 57–65
- Bloodnick E. (2018). Principios básicos de los sustratos. Obtenido el 14 de mayo de 2018 de <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/principios-basicos-de-los-sustratos/>
- Bradley D. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*. 159. 2100-2110
- Cameron, R. W. F., Taylor J. E. y Emmet, M, R. (2014). What’s `cool` in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties od green walls. *Building and Environment*. 73 ,198 -207.
- Secretaría del Medio Ambiente. (N.D). Catálogo de Plantas Vivero Nezahualcoyotl. Recuperado de

Chang J. (N.D.) Calidad del agua. Recuperado de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6145/2/Calidad%20de%20Agua%20Unidad%201%2C2%2C3.pdf>

Clinton A., Ifije O. y Thulisile Z. (2017). Sustainable construction practices: “a lazy view” of construction professionals in the South Africa construction industry. Energy Procedia 105. 3003 – 3010

Clinton A., Ifije O. y Thulisile Z. (2017). Sustainable construction practices: “a lazy view” of construction professionals in the South Africa construction industry. Energy Procedia 105. 3003 – 3010

Clinton A. Y Olusegun O, (2017). Biomimicry principles as evaluation criteria of sustainability in the construction industry. Energy Procedia 142. 2491–2497

Coma, J., Pérez, G., De García, A., Burés, S., Urrestarazu, M. y Cabeza L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. Building and Environment. 111, 228 -237.

Consulta plantas (2010). Cuidados de la planta duranta. Consultado el 06 de abril del 2019 <http://www.consultaplantas.com/index.php/plantas-por-nombre/plantas-de-la-d-a-la-l/305-cuidados-de-la-planta-duranta-repens-duranta-erecta-o-flor-celeste>

Consulta plantas. (2018). Cuidados de la planta Lonicera japonica o Madreselva del Japón. Consultado el 7 de agosto del 2018 <http://www.consultaplantas.com/index.php/plantas-por-nombre/plantas-de-la-d-a-la-l/503-cuidados-de-la-planta-lonicera-japonica-o-madreselva-del-japon>

Consulta plantas. (2018). Cuidados de la planta Parthenocissus quinquefolia o Parra virgen. Consultado el 7 de agosto del 2018 de <http://www.consultaplantas.com/index.php/plantas-por-nombre/plantas-de-la-d-a-la-l/503-cuidados-de-la-planta-lonicera-japonica-o-madreselva-del-japon>

Consulta plantas (2018). Cuidados de la planta plectranthus Consultado el 06 de Abril del 2019 <http://www.consultaplantas.com/index.php/plantas-por-nombre/plantas-de-la-m-a-la-r/638-cuidados-de-la-planta-plectranthus-verticillatus-o-planta-del-dinero>

Consulta plantas. (2018). Cuidados de la planta thunbergia alata o susana de ojos negros. Consultado el 06 de Abril del 2019 <http://www.consultaplantas.com/index.php/plantas-por-nombre/plantas-de-la-s-a-la-z/772-cuidados-de-la-planta-thunbergia-alata-o-susana-de-ojos-negros>

Cuce E. (2017). Thermal regulation impact of green walls: An experimental investigation. *Applied Energy* 194. 247-254

Dieleman, H. (2017). Urban Agriculture in México City, balance between ecological, economic, social and symbolic value. *Journal of Cleaner Production*. 163. S156-s163

Department of Environment and Primary Industries. (2014). *Growing Green Guide: A guide to green roof. Walls and facades in Melbourne and Victoria, Australia*. State of Victoria, Australia. Recuperado el 18 de noviembre de 2017 de: http://www.growinggreenguide.org/wpcontent/uploads/2014/02/growing_green_guide_ebook_130214.pdf

ECO-TEC Soluciones Ambientales. (n.d). *Manual de la Técnica ECOTECH Bi4PVS*. Recuperado el 06 de febrero del 2018 de http://www.academia.edu/34875735/Manual_ECOTECH_ultimo Preguntar

Ebtesam, E. (2016). Improving Sustainability Concept in Developing Countries. *Procedia Environmental Sciences*. 34, 119 – 130.

Escamilla E., Habert G. (2014). Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity *Journal of Cleaner Production* 69. 117-127

Espinosa F. (2016). *Caracterización de botellas de PET para su uso como elementos constructivos de muros de carga*. Tesis de Maestría. ITESO

Faridah Hanim Mohamed Farid, Sabarinah Sh Ahmad, Abu Bakar Abd. Raub, Mariam Felani Shaari . (2016). Green “Breathing Facades” for Occupants’ Improved Quality of Life. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 234, 173-184.

Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2008). Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007 que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal. Recuperada el 27 de agosto del 2018 de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/DISTRITO%20FEDERAL/Normas/DFNORM23.pdf>

Gaowen Z., Jingpei L. & Wei S. (2018). Effect of mixed chlorides on the degradation and sulfate diffusion of cast in situ concrete due to sulfate attack. *Construction and Building Materials* 181. 49–58

Garcés L., Mejía E. y Santamaría J. (n.d). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de investigación* vol. 1. 83-92. Recuperado de

<http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/083-92%20La%20fotocat%C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>

García J. (2012). Sistemas de captación y aprovechamiento de agua pluvial para un eco barrio de la cd. de México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Generación Verde. (2014). Planta rocío. Consultado el 22 de abril del 2019 de <https://generacionverde.com/plantas/rocio/>

Getter, K. L., Rowe, D. B. y Andersen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof storm water retention. *Ecological Engineering*. 31, (4), 225 – 231

González G, (2010). Casas Ecológicas. Obtenido el 4 de Junio de 2018 de www.permacultura.mx/reporte/casas-ecologicas/

Hablemos de flores. (2015). Clematis: Propiedades, clasificación, cuidados y mucho más. Consultado el 7 de agosto del 2018 de <http://hablemosdeflores.com/clematis/>

Hadas Gabaya, Isaac A. Meir , Moshe Schwartz & Elia Werzberger . (2014) Cost-benefit analysis of green buildings: An Israeli office buildings case study. *Energy and Buildings* 76. 558–564

Hernández F. (n.d). Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso. Manual de capacitación para la participación comunitaria. Recuperado el 19 de septiembre de 2018 de http://licenciatura.iconos.edu.mx/k_angi/nueva/tienda/biblioteca/Manual%20Captacion%20de%20agua%20de%20lluvia.pdf

Hogarmanía. (2010). Petunia, consejos para sus cuidados. Consultado el 05 de enero del 2019 <https://www.hogarmania.com/jardineria/fichas/plantas/201003/petunia-5141.html>

Hoyos A. (2012). Concreto translúcida transmisión de luz visible a través de morteros con fluorita como agregado fino. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/7232/1/76328514.2012.pdf>

Hydro Environment. (n.d). Tipos de sustratos para hidroponía. Obtenido el 14 de mayo de 2018 de https://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=32

Info jardín (2017). Bignonia capreolata. Consultado el 06 de Abril del 2019 <http://fichas.infojardin.com/trepadoras/bignonia-capreolata-doxanta-capreolata-bignonia-trepadora.htm>

INFONAVIT. (2018). Hipoteca Verde. Consultado el 06 de noviembre del 2018 de http://portal.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/infonavit/trabajadores/cuido_mi_casa/hipoteca+verde

Jiménez A. & Barba A. (N.D). DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CALIDAD DE LAS AGUAS. Recuperado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieria-ambiental/otros-recursos-1/OR-F-001.pdf>

Jose el jardinero (2018). Coleo cretona. Consultado el 06 de Abril del 2019 <https://www.joseeljardinero.com/coleo-cretona/>

Joshi, S. V. y Gosh, S. (2014). On the air cleansing efficiency of an extended green wall: a CFD analysis of mechanistic details of transport processes. *Journal of Theoretical Biology*. 361, 101 – 110.

Kissia E., Abdulai M. y Yamoah D. (2018). Drivers militating against the pricing of sustainable construction materials: The Ghanaian quantity surveyor perspective. *Studies in Construction Materials* 8. 507–516

Korola E. y Shushunova N. (2016). Benefits of a Modular Green Roof Technology. *Procedia Engineering* 161. 1820 – 1826.

Labuschagne P. y Zulch B. (2016). Green Rooftop Systems: A South African Perspective. *Energy Procedia* 96. 710 – 716

Lamrani M., Laaroussi N., , Khabbazi A., Khalfaouia M., Garoumb M. & Feizc A. (2017). Experimental study of thermal properties of a new ecological building material based on peanut shells and plaster. *Case Studies in Construction Materials* 7. 294–304

Li J. Wai O., Li Y., Zhan J., Ho Y., Li J., Lam E. (2010). Effect of green roof on ambient CO2 concentration. *Building and environment*. 45. 2644-2651

Lee L. y Jim C. (2017). Subtropical summer thermal effects of wirerope climber green walls with different air-gap depths. *Building and Environment* 126. 1-12.

Licht J, Lundholm J. (2006) Native coastal plants for northeastern extensive and semiintensive green roof trays: substrates, fabrics and plant selection. In: Paper presented at the proceedings of the fourth annual greening rooftops for sustainable communities conference.

Maderos K. (2017). La Verdolaga de Costa, *Sesuvium portulacastrum*. *Naturaleza tropical*. Consultado el 8 de agosto del 2018 de <https://naturalezatropical.blogspot.com/2017/10/Sesuvium-portulacastrum.html>

Manso M., Castro J. (2014). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41. 863-871.

Manso M., Castro J. (2016). Thermal analysis of a new modular system for green walls. *ELSEVIER: Building Engineering* 7. 53-62

Martínez A. y Cote M. (2014). Diseño y Fabricación de Ladrillo Reutilizando Materiales a Base de PET. *ING E CUC* vol.10, no. 2. 76-80

Mayrand, F., Clergeau, Ph., Vergens, A. y Madre, F. (2018). Vertical Greening Systems as Habitat for Biodiversity. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*. Chapter 3.13. 227 – 237. Butterworth-Heinemann. ISBN 9780128121504.

Medla A., Stangl R., Kikuta S. & Florineth F. (2017). Vegetation establishment on Green Walls: Integrating shotcrete walls from road construction into the landscape. *Urban Forestry & Urban Greening* 25. 26-35

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

Muhammad S., Reeho K., Muhammad R. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90. 757-773

Muñoz L. (2012). Estudio del uso del polietileno tereftalato (pet) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México

Musy M., Malys L., Inard C. (2017). Assessment of direct and indirect impacts of vegetation on building comfort: A comparative study of lawns, green walls and green roofs. *Procedia Environmental Sciences* 38. 603 – 610.

Morakinyo T., Dahanayake K., Ng E., Chow C. (2017). Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy and Buildings* 145. 226-237

Morán J. (2015). Construir con bambú. Manual de construcción. Red Internacional de Bambú y Ratán, INBAR. Recuperado de: https://www.sheltercluster.org/sites/default/files/docs/construir_con_bambu_peru.pdf

Ó. E. Ospina-Zúñiga y H. Ramírez-Arcila, “Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia”. *Ingeniería Solidaria*, vol. 10, n.º 17, pp. 125-138, en.-dic., 2014. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.812>

Ordoñez R., Mejía T., Bárcenas G., Instituto de Ecología A.C. (Inecol). (n.d). Manual para la construcción sustentable con bambú. SEMARNAT. Recuperado el 13 de agosto del 2018 de http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/MANUAL_PARA_LA_CONSTRUCCION_SUSTENTABLE_CON_BAMBU.PDF

Ottel , M., Perini, K., Fraaij, A.L.A., Hass, E. M. y Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*. 43. 3419 -3429.

Pascual E. (2015). Casas ecologicas. Obtenido el 30 de mayo de 2018 de <https://elblogverde.com/casas-ecologicas-todo-lo-que-debes-saber/>

Naomi J. Paulla, Peter J. Irgab, Fraser R. Torpy (2018). Active green wall plant health Tolerance to diesel smoke exposure. *Environmental Pollution*. 240. 448-456

Pérez G, Coma J, Sol  C, Castell A, Cabeza L. (2012). Green roofs as passive system for energy savings when using rubber crumbs as drainage layer. *Energy Procedia* 30. 452–60.

Prodanovic, et. al. (2017). Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal. *Ecological Engineering* 102. 625–635

Prieto N. (2018). Ladrillo de plástico reciclado. Obtenido el 05 de septiembre 2018 de <http://tectonicablog.com/?p=112648>

Reyes C. (2013). El PET como sistema alternativo para la construcción de muros en la vivienda. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana.

Riley, B. (2017). The state of art of living walls: Lessons learned. *Building and Environment*. 114, 219 – 232.

Roman Milwicz & Piotr Nowotarski (2015).Influence of multiphase flexible timber frame house construction on housing affordability. *Procedia Engineering*. 122. 158 – 165

Rosasco P. & Perini K (2018) Evaluating the economic sustainability of a vertical greening system: A Cost Benefit Analysis of a pilot project in mediterranean area. *Building and Environment*. 142. 524-533

Rosasco P & Perini k. (2018). Evaluating the Economic Sustainability of a Vertical Greening system: A Cost-Benefit Analysis of A Pilot Project In Mediterranean area. *Building and Environment*. 142. 524-533

Ruiz D., López C., Cortes E., Froese A. (2012). Nuevas alternativas en la construcción: botellas de PET con relleno de tierra*. *Apuntes* 25 (2). 292-303.

Sánchez C. (2013). Estructura de bambú caso estudio: Escenario sustentable. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Sánchez I. (2012). Manual para el diseño e instalación de una azotea verde. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México

Sánchez J. (2013). El bambú como material ecológico para la construcción. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Sánchez S. (2014). 11 normas y certificaciones de edificación sustentable en México. Obras web. Consultado el 06 de noviembre del 2018 de <http://obrasweb.mx/construccion/2014/08/28/11-normas-y-certificaciones-de-edificacion-sustentable-en-mexico>

Sañudo A. (2013). Sustratos para terrazas verdes y jardines verticales. Obtenido de http://www.economiayviveros.com.ar/julio2013/produccion_cultivo-plantas_ornamentales_y_flores_de_corte_1.html

Saxena F.& Tembhurkar (2018). Impact of use of Steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. Construction and Building Materials 165. 126–137

Serrano S. (2014). Aprovechar el agua de lluvia doble solución. Periódico digital de divulgación de la Red del Agua UNAM núm. 1. 23-27.

Sette R. (1996). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Editorial Reverté

Sharma B., Gatóo A., Bock M., Ramage M. (2015). Engineered bamboo for structural applications. Construction and Building Materials 81. 66–73

Soto, Silvina M., Coviella L., Estancanelli M. Y Santiago. (2011). Catálogo de plantas para techos verdes. Argentina: Ministerio de agricultura, ganadería y pesca. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_catlogo_de_plantas_para_techos_verdes.pdf

Spiesz P., Rouvas R. y Brouwers H. (2016). Utilization of waste glass in translucent and photocatalytic concrete. Construction and Building Materials 128. 436–448

Tovar E., Figueroa A., Gordon M. (2014). Criteria for selection of plant species for its deployment in thermally efficient architectural green roofs in the Metropolitan Area of Mexico City: methodological guidelines. Energy Procedia 57. 1798–1807

Townshend D. (2007). Study on green roof application in Hong Kong. Final Report. 42–110.

Ugai T. (2015). Evaluation of sustainable Roof from Various Aspects and Benefits of Agriculture Roofing in Urban Core. *Procedia- Social and Behavioral Sciences* 216. 850-860

Vibrans H. (2009). *Hedera helix*. Malezas de México. Consultado el 7 de agosto del 2018 de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/araliaceae/hederahelix/fichas/ficha.htm>.

Vijayaraghavan K. y Raja F. (2014). Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Research* 36. 94-101.

Vijayaraghavan K. y Raja F. (2014). Design and development of green roof substrateto improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Research* 63. 94-101

Vijayaraghavan K. (2015). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57. 40–752

Vijayaraghavan K. y Raja F. (2015). Pilot-scale evaluation of green roofs with *Sargassum* biomass as an additive to improve runoff quality. *Ecol Eng* 75. 70–8

Vijayaraghavan K. (2016). Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends *Renew Sustain Energy Rev* 57. 740–52.

Wallbarn. N.D., A BROWN ROOF IS WHERE THE SUBSTRATE SURFACE IS LEFT TO SELF-VEGETATE FROM WINDBLOWN AND BIRD LIME SEED DISPERSAL. Recuperado de <https://www.wallbarn.com/brown-roofs/>

Wong G., Jim C. Y. (2014). Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecol Eng* 70. 366–78

Zhang Q., Miao, L., Wang, X., Liu, D., Zhu, L., Zhou, B., Sun, J. y Liu, J. (2015). The capacity of greening roof to reduce storm water runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning*. 144, 142 – 150

Zhang S., Zhang J., Jing X., Wang Y., Wang Y., Yue T. (2018). Water saving efficiency and reliability of rainwater harvesting systems in the context of climate change *Journal of Cleaner Production* 196. 1341-1355

Chang R., Zuo J., Soebarto V., Lu Y., Zillante G., Gan X. (2018). Sustainability attitude and performance of construction enterprises: A China study. *Journal of cleaner production*. 172.

REFERENCIAS IMÁGENES

AFP/Getty Images. (2018). Puente Togetsu sobre el río Katsura en Kyoto durante las fuertes lluvias en el oeste de Japón. [Fotografía]. <https://www.lagranepoca.com/assets/uploads/2018/07/GettyImages-992527452-795x447.jpg>

Alibaba. (2018). Geotextil. [Fotografía]. <https://www.eusmile.com/items/OT00409P/7.jpg>

Ar.blastingnews. (2015). Casas hechas de plástico a prueba de catastrofes. [Fotografía]. <https://ar.blastingnews.com/mundo/2015/11/casas-hechas-con-botellas-de-plastico-a-prueba-de-catastrofes-00643753.html>

Archinect. (n.d). [Fotografía]. <https://i.pinimg.com/564x/e5/2a/80/e52a80f47944a765eaa7d7c49d4111c7.jpg>

Askyl. (n.d). ad54e866ba7b5006ae2f6fb4bb41f2f9. [Fotografía]. <https://foto.askix.com/upload/a/d5/ad54e866ba7b5006ae2f6fb4bb41f2f9.jpg>

Blogdaengenharia. (2016). blog-da-engenharia_captar-agua-chuva. [Ilustración]. https://blogdaengenharia.com/wp-content/uploads/2016/10/blog-da-engenharia_captar-agua-chuva2-269x300.jpg

Civilgeeks. (2011). Pernada con pletinas paralelas. [Ilustración]. <https://civilgeeks.com/wp-content/uploads/2011/12/Uni%C3%B3n-Pernada-Con-Pletinas-Paralelas.jpg>

Consulta plantas. (06 de abril del 2019). Duranta [Fotografía]. Recuperado de <http://www.consultaplantas.com/index.php/plantas-por-nombre/plantas-de-la-d-a-la-l/305-cuidados-de-la-planta-duranta-repens-duranta-erecta-o-flor-celeste>

Consulta plantas. (06 de Abril del 2019). Planta del dinero [Fotografía]. Consultado el <http://www.consultaplantas.com/index.php/plantas-por-nombre/plantas-de-la-s-a-la-z/772-cuidados-de-la-planta-thunbergia-alata-o-susana-de-ojos-negros>

Consulta plantas. (06 de Abril del 2019). Plectranthus [Fotografía]. Recuperado de <http://www.consultaplantas.com/index.php/plantas-por-nombre/plantas-de-la-m-a-la-r/638-cuidados-de-la-planta-plectranthus-verticillatus-o-planta-del-dinero>

David Eickhoff. (2008). Sesuvium portulacastrum. [Fotografía]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sesuvium_portulacastrum_\(5188551000\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sesuvium_portulacastrum_(5188551000).jpg)

g

Decorideas. (2015). [Fotografía] <http://icanhasgif.com/wp-content/uploads/2017/04/vertical-garden-planters-965x1024.jpg>

Dog of the forest. Sedum acre. [Fotografía] <https://plants.ces.ncsu.edu/media/images/Sedum-acre--dog-of-the-forest--cc-by-nc-nd-2-0.jpg>

Eco green roofs. (N.D.). Techo marrón. [Imagen.] <http://ecogreenroofs.co.uk/wp-content/uploads/2014/11/WESTFIELDS-STRATFORD.jpg>

Ecoinventos. (2017). Casa de bambú inspirada en el Feng Shui. [Fotografía]. <https://ecoinventos.com/wp-content/uploads/2017/04/casa-de-bamb%C3%BA-inspirada-en-el-Feng-Shui3.jpg>

Ecojardin unam. (2014). Azotea Verde. [Fotografía] <https://ecojardinunam.files.wordpress.com/2014/09/azotea-verde.jpg>

Edu Castillo. (2014). Paleta natural. [Fotografía] http://s2.glbimg.com/FLxlZPMDSvv2qeSWzyEHrwVazJLJdgHEs82W86O66bJloz-HdGixxa_8qOZvMp3w/e.glbimg.com/og/ed/f/original/2014/02/04/paletanatural.jpg

Eurico Zimbres. (2007). Lonicera Japonica. [Fotografía]. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/Lonicera_japonica.jpg

Generación Verde. (2014). Rocío. [Fotografía]. Recuperado de <https://generacionverde.com/plantas/rocio/>

Geoproducts. Corp. (n.d.). Geodren. [Imagen]. <http://www.geoproductscorp.com/en/prodotti/geodren/img/geodrenimg01.jpg>

Galabau Praxis. (n.d.). Floradrain. [Fotografía]. https://galabau-praxis.de/files/GalabauPraxis/content/Fotos/Aktuelles_April2016/zinco_2.jpg

Hogarmania. (2019). Petunia [Fotografía]. Recuperado de <https://www.hogarmania.com/jardineria/fichas/plantas/201003/petunia-5141.html>

Infojardin. (2019). Bignonia capreolata [Fotografía]. Recuperado de <http://fichas.infojardin.com/trepadoras/bignonia-capreolata-doxanta-capreolata-bignonia-trepadora.htm>

Jan Zima. (2012). Sedum mexicum Gold Moun <https://www.biolib.cz/IMG/GAL/181795.jpg>

Jay Sturner. (2003). Parthenocissus quinquefolia. [Fotografía]. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/Virginia Creeper %28Parthenocissus quinquefolia%29 - Flickr - Jay Sturner.jpg/395px-Virginia Creeper %28Parthenocissus quinquefolia%29 - Flickr - Jay Sturner.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d3/Virginia_Creeper_%28Parthenocissus_quinquefolia%29_-_Flickr_-_Jay_Sturner.jpg/395px-Virginia_Creeper_%28Parthenocissus_quinquefolia%29_-_Flickr_-_Jay_Sturner.jpg)

Jolly Janner. (2009). Clematis. [Fotografía] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clematis %27Nelly Moser%27.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clematis_%27Nelly_Moser%27.JPG)

Jose el jardinero. (06 de abril del 2019). Coleo cretona [Fotografía]. Recuperado de <https://www.joseeljardinero.com/coleo-cretona/>

Martin Greslou (2008). Ocna Sibiului la soare. [Fotografía] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ocna Sibiului, la soare.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ocna_Sibiului_la_soare.jpg)

Joaquín Sánchez. (2015). Amarre cuadrado. [Ilustración]. <https://rescateurbanousar.files.wordpress.com/2015/05/amarre-cuadrado.png?w=300&h=264>

Newsela. (2015). Begin smog spanish. [Fotografía] https://nails.newsela.com/s3/newsela-media/article_media/2016/01/beijing-smog-spanish-13af6b4d.jpg?crop=0%2C276%2C5335%2C3275&height=497&width=885

Otodo/flickr. (2016). Bobby_ Maagill_CC_Amokestack. [Fotografía] [http://assets.climatecentral.org/images/made/01_01_2016 Bobby Magill CC Smoke stack 720 542 s c1 c c.jpg](http://assets.climatecentral.org/images/made/01_01_2016_Bobby_Magill_CC_Smoke_stack_720_542_s_c1_c_c.jpg)

Progres. (2018). La Journée de la Terre dénonce la pollution par le plastique. [Fotografía] [http://www.progres.net.eg/Upload/News/28-4-2018_14_19_38 Progres 21643267-24611042.jpg](http://www.progres.net.eg/Upload/News/28-4-2018_14_19_38_Progres_21643267-24611042.jpg)

Sannicolasdeugarte. (2010). Hojas de Hedera hélix. [Fotografía]. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Hojas de Hedera helix.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Hojas_de_Hedera_helix.jpg)

Sealeco. (2018). Sedum 2 green roof sealeco. [Fotografía] [http://sealeco.com/wp-content/uploads/2014/04/Sedum 2 green roof sealeco.png](http://sealeco.com/wp-content/uploads/2014/04/Sedum_2_green_roof_sealeco.png)

Tectonicablog. (2018). Hk0Ax9s1f_720x0. [Fotografía]. http://tectonicablog.com/wp-content/uploads/2018/04/Hk0Ax9s1f_720x0.jpg

Terri Meyer Boake B.E.S. B.Arch. M.Arch., Université de Waterloo. (2013). Azotea verde intensiva, Vancouver Librería pública. [Fotografía] http://toitvertclaro.ca/sites/default/files/Dcp_2675.jpg