



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE
TECHO VERDE**

MANUEL HUMBERTO TOBAR MEJÍA

Asesorado por la Inga. Nora Leonor Elizabeth García Tobar

Guatemala, enero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE
TECHO VERDE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL HUMBERTO TOBAR MEJÍA

ASESORADO POR LA INGA. NORA LEONOR ELIZABETH GARCÍA TOBAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO INDUSTRIAL

GUATEMALA, ENERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

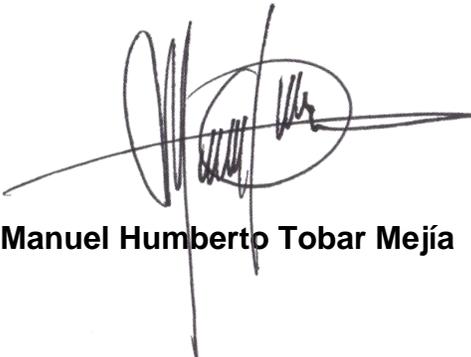
DECANO (A.i.)	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADORA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Nora Leonor García Tobar
EXAMINADORA	Inga. María Martha Woldford Estrada
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE
TECHO VERDE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha Enero, 2015.



Manuel Humberto Tobar Mejía

Guatemala, 11 de Septiembre de 2016

Ingeniero
Director de la Escuela
Juan José Peralta Dardón
Ingeniería Mecánica Industrial
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

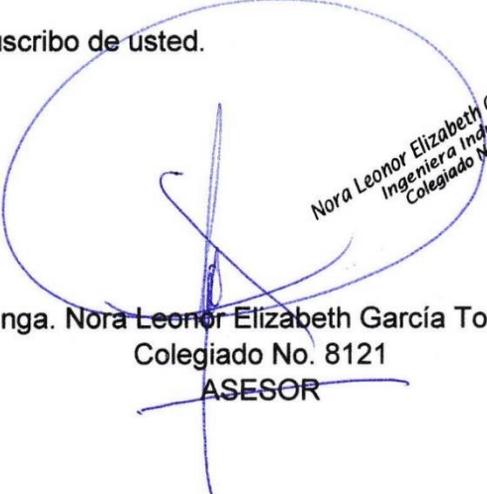
Estimado Señor Director:

Por medio de la presente informo a usted, que he asesorado y revisado el trabajo de tesis titulado ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE TECHO VERDE., elaborado por el estudiante Manuel Humberto Tobar Mejía con carné 2002-19508, previo obtener el título de Ingeniero Industrial.

Habiendo determinado de dicho trabajo cumple con los requisitos establecidos de la Facultad de Ingeniería, y reconociendo la importancia del tema. Por todo lo anterior tanto el autor como el asesor somos responsables del contenido y conclusiones del presente trabajo de tesis y en consecuencia, por medio de la presente me permito APROBARLO, agregado que lo encuentro completamente satisfactorio.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,


Nora Leonor Elizabeth García Tobar
Ingeniera Industrial
Colegiado No. 8121

Inga. Nora Leonor Elizabeth García Tobar
Colegiado No. 8121
ASESOR



Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE TECHO VERDE**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Humberto Tobar Mejía**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Karla Lizbeth Martínez Vargas
Ingeniera Industrial
Colegiada No. 5,706

Inga. Karla Lizbeth Martínez Vargas
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, octubre de 2016.

/mgp



REF.DIR.EMI.228.016

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE TECHO VERDE**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Humberto Tobar Mejia**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. José Francisco Gómez Rivera
DIRECTOR a.i.
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, noviembre de 2016.

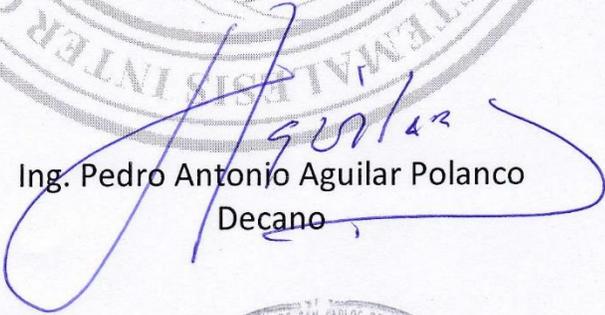
/mgp



DTG. 023.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS DE TECHO VERDE**, presentado por el estudiante universitario: **Manuel Humberto Tobar Mejía**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, enero de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Fredy Tobar y Mirna Mejía por darme la vida, por enseñarme los principios fundamentales y valores, su ejemplo, amor, apoyo, confianza e inspiración.
- Mis hermanos** Emerson y Mitzi Tobar Mejía, por enseñarme a querer y ser querido, por ser un apoyo incondicional.
- Mis sobrinos** Diego Tobar, Andrea Tobar, Gabriel Sicán y Luna Tobar, por inyectarle su inocencia y alegría a mis jornadas de estudio.
- Mi Abuela** Linda Rosales (QEPD) por darme sus palabras de aliento y apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que fue la fuente de conocimiento, desarrollo intelectual y profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos necesarios para desempeñarme como profesional.
Unidad de Investigación de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Escuela Mecánica Industrial	Por darme el espacio y los recursos necesarios para el desarrollo de la culminación de esta investigación.
Inga. Nora Leonor García	Por su tiempo invertido, su confianza, apoyo y recomendaciones para el desarrollo de esta investigación.
Mis compañeros de la Facultad	Brian Chicol, Douglas Urrutia, Jonathan García, Juan Carlos Jerez, Juan José Barrios, Andrea Vivas, Lester Aguilar, Luis Reyes, Luis Palencia, Marco Antonio Pérez, Omar García, Ricardo Montepeque, Samuel Ortiz y Waleska Lima, por apoyarme y ayudarme a cumplir mis metas durante toda mi carrera.

Mis cuñados

Blanca Pérez y Javier Sicán por su apoyo en mis jornadas de estudio.

Mis amigos

Ángel Rosales, Astrid Díaz, Carol Casanova, Christian Vásquez, Marco Antonio Guzmán, Marco Proietti, Geny Rodríguez, Juan Luis Morales, Patrick Vides, por su apoyo incondicional.

2.1.1.	Soporte estructural o capa base.....	20
2.1.2.	Sistema de desalojo de agua o caídas de agua.....	21
2.1.3.	Aislamiento térmico	23
2.1.4.	Membrana antiraíz impermeabilizante	26
2.1.5.	Capa drenante.....	28
2.1.6.	Capa filtrante	30
2.1.7.	Capa de sustrato	31
2.1.8.	Capa de vegetación	33
2.2.	Otros componentes de un techo verde	34
2.2.1.	Sistemas de irrigación	35
2.2.2.	Tipos de inclinación del techo	37
2.2.2.1.	Techos verdes horizontales.....	39
2.2.2.2.	Techos verdes de poca inclinación	40
2.2.2.3.	Techos verdes de fuerte inclinación	41
2.2.2.4.	Techos verdes empinados	43
2.2.3.	Sistemas de seguridad.....	44
3.	UBICACIÓN PARA LOS PROTOTIPOS DE TECHO VERDE	47
3.1.	Aspectos técnicos	47
3.1.1.	Ubicación.....	47
3.1.2.	Latitud, longitud y altitud sobre el nivel del mar	48
3.1.3.	Clima	49
3.1.4.	Temperatura.....	50
3.1.5.	Humedad.....	52
3.1.6.	Precipitación.....	53
3.1.7.	Vientos	54
3.1.8.	Presión atmosférica.....	55
3.1.9.	Incidencia solar	55

4.	PROTOTIPO TECHO VERDE	57
	4.1.1. Elementos.....	57
	4.1.1.1. Estructura portante	57
	4.1.2. Sistema de desalojo de agua.....	64
	4.1.3. Techo verde.....	67
	4.1.4. Aislante térmico	67
	4.1.5. Membrana antiraíz, impermeabilizante	69
	4.1.6. Capa drenante	72
	4.1.7. Capa filtrante	73
	4.1.8. Capa de sustrato	75
	4.1.9. Capa de vegetación.....	77
	4.2. Mantenimiento del techo verde.....	84
	4.3. Presupuesto	86
	4.4. Metodología de monitoreo	88
	4.5. Hojas de control.....	89
	4.6. Recurso humano	91
5.	ANÁLISIS DE FACTORES AMBIENTALES POR IMPACTAR EN PROTOTIPO DE TECHO VERDE	93
	5.1. Temperatura	94
	5.2. Ruido	95
	5.3. Humedad	98
	5.4. Radiación solar.....	100
	5.5. Caudal de descarga de agua de lluvia	102
	5.6. Consumo eléctrico	103
	5.7. Producción de oxígeno y limpieza del aire	103
6.	MODELO ESTADÍSTICO INFERENCIAL DEL IMPACTO DEL USO DEL TECHO VERDE EN GUATEMALA.....	105

6.1.	Variables y datos.....	108
6.2.	Cálculo del modelo estadístico.....	119
6.3.	Resultados	124
6.4.	Discusión de resultados	136
7.	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD.....	139
7.1.	Costos de instalación de un techo verde.....	139
7.1.1.	Costos de preinstalación	139
7.1.2.	Costo de instalación del techo verde.....	140
7.2.	Costo de mantenimiento del techo verde	141
7.3.	Costos de oportunidad al no instalar un techo verde	141
7.3.1.	Costos de mantenimiento del techo de la edificación	141
7.3.2.	Costos de consumo eléctrico por elementos de aire acondicionado	142
7.4.	Análisis costo – beneficio	143
	CONCLUSIONES.....	149
	RECOMENDACIONES	153
	BIBLIOGRAFÍA.....	155

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sección de techo verde extensivo.....	4
2.	Sección de techo verde intensivo.....	6
3.	Sección de techo verde semi-intensivo.....	7
4.	Sección capas que componen un techo verde.....	19
5.	Poliuretano con cubiertas de fibra de vidrio	24
6.	Espuma de polietileno laminada en aluminio	25
7.	Poliestireno extruido.....	26
8.	Aplicación de una pintura bituminosa.....	27
9.	Tela para refuerzo de poliéster	28
10.	Drenaje nodular de polietileno de alta densidad.	29
11.	Geositético, familia de Macdrain	30
12.	Sección de un techo verde horizontal	40
13.	Sección de un techo verde de poca inclinación	41
14.	Sección de un techo verde de fuerte inclinación	42
15.	Sección de un techo verde empinado	43
16.	Punto de anclaje por elemento preenchufados	44
17.	Punto de anclaje móvil en carril	45
18.	Irradiación solar en Guatemala (2010).....	56
19.	Ejemplo de sección transversal de una losa	58
20.	Diseño de prototipo de techo verde.....	60
21.	Elevación frontal de prototipo de techo verde	61
22.	Elevación trasera de prototipo de techo verde	61
23.	Elevación derecha de prototipo de techo verde	62

24.	Elevación izquierda de prototipo de techo verde	62
25.	Diagrama de explosión de prototipo de techo verde, vista superior izquierda	63
26.	Diagrama de explosión de prototipo de techo verde, vista superior derecha	64
27.	Sistema de drenaje dentro de la estructura	65
28.	Sistema de drenaje fuera de la estructura	66
29.	Sección del diseño del techo verde (soporte estructural y sistema de desalojo de agua)	66
30.	Espuma de polietileno laminada en aluminio	68
31.	Sección del diseño del techo verde (aislante térmico)	69
32.	Membrana impermeable prefabricada de asfalto modificado con polímero APP (polipropileno atáctico)	70
33.	Aplicación de emulsión asfáltica a base de agua	71
34.	Sección del diseño del techo verde (membrana antiraíz, impermeabilizante)	71
35.	Sellado de traslape de secciones de drenaje nodular	72
36.	Sección del diseño del techo verde (capa drenante)	73
37.	Geosintético MacDrain	74
38.	Sección del diseño del techo verde (capa filtrante)	74
39.	Sección de instalación de capa filtrante	75
40.	Sección del diseño del techo verde (capa de sustrato)	76
41.	<i>Stenotaphrum secundatum</i> (grama San Agustín)	78
42.	<i>Catharanthus roseus</i> (vinca de Madagascar)	79
43.	<i>Gardenia Jasminoides</i> (gardenia)	80
44.	<i>Aphelandra squarrosa</i> (afelandra)	81
45.	<i>Cactaceae</i> (cactáceas)	82
46.	Sección del diseño del techo verde (capa de sustrato)	84
47.	Termohigrómetro (PCE-FWS 20)	87

48.	Termómetro de globo	87
49.	Hoja de registro y control de prototipos de techo verde	90
50.	Dependencia de la aislación acústica del aire con el peso de las superficies	96
51.	Evapotranspiración potencial en Guatemala.....	99
52.	Esquema del balance energético para un techo verde	100
53.	Gráfica de intervalo de confianza y probabilidad para la prueba de hipótesis.....	131
54.	Gráfico de comparación de temperaturas real - regresión	133
55.	Gráfico de comparación de temperatura real – temperatura obtenida por medio del modelo de regresión para la reducción de temperatura al instalar un techo verde	135
56.	Gráfico de comparación de datos reales con datos obtenidos por medio del modelo de regresión respecto de reducción de la temperatura dentro de la edificación	136
57.	Imagen del aire acondicionado seleccionado.....	143
58.	Gráfica flujo de gastos para la implementación del techo verde	146
59.	Gráfica flujo de gastos para la implementación sistema de aire acondicionado	147

TABLAS

I.	Cargas vivas de uso frecuente	20
II.	Pendientes mínimas por tipo de cubierta	37
III.	Tabla de conversión de porcentaje de inclinación a grados y de grados a porcentaje de inclinación	38
IV.	Temperatura promedio en la ciudad de Guatemala (1999-2011).....	51
V.	Temperatura promedio en la ciudad de Palín, Escuintla (1999- 2011).....	51
VI.	Humedad relativa promedio en la ciudad de Guatemala (1999- 2011).....	52
VII.	Humedad relativa promedio en la ciudad de Palín, Escuintla (1999- 2011).....	53
VIII.	Precipitación promedio en la ciudad de Guatemala (1999-2011).....	53
IX.	Precipitación promedio en la Palín, Escuintla (1999-2011)	54
X.	Velocidad del viento en la ciudad de Guatemala (1999-2011).....	54
XI.	Velocidad del viento en la ciudad de Palín, Escuintla (1999-2011).....	55
XII.	Cargas por tipo de techo verde en estado saturado	58
XIII.	Desglose de costos para el prototipo de techo verde	86
XIV.	Desglose de costos de instrumentos de medición para prototipos de techo verde	88
XV.	Porcentaje de retención de agua de lluvia por tipo de techo verde....	102
XVI.	Temperatura en la ciudad de Caracas, Venezuela del 1 al 9 de enero de 2009	109
XVII.	Temperatura en la ciudad de Tolima, Colombia del 1 al 12 de octubre de 2012	109
XVIII.	Temperatura en la ciudad de Colima, México del 1 al 31 de octubre de 2008	110

XIX.	Temperatura en la ciudad de Guatemala, Guatemala del 1 al 9 de enero de 2009.....	111
XX.	Temperatura en la ciudad de Guatemala, Guatemala del 1 al 12 de octubre de 2012.....	111
XXI.	Temperatura en la ciudad de Guatemala, Guatemala del 1 al 31 de octubre de 2008.....	112
XXII.	Temperatura dentro de la edificación sin techo verde en la ciudad de Caracas, Venezuela del 1 al 9 de enero de 2009.....	113
XXIII.	Temperatura dentro de la edificación sin techo verde en la ciudad de Tolima, Colombia del 1 al 12 de octubre de 2012.....	113
XXIV.	Temperatura dentro de la edificación sin techo verde en la ciudad de Colima, México del 1 al 31 de octubre de 2008.....	114
XXV.	Temperatura dentro de la edificación con techo verde en la ciudad de Caracas, Venezuela del 1 al 9 de enero de 2009.....	115
XXVI.	Temperatura dentro de la edificación con techo verde en la ciudad de Tolima, Colombia del 1 al 12 de octubre de 2012.....	115
XXVII.	Temperatura dentro de la edificación con techo verde en la ciudad de Colima, México del 1 al 31 de octubre de 2008.....	116
XXVIII.	Cálculo de diferencia de temperaturas (ΔT_1) entre edificaciones sin techo verde y con techo verde.....	117
XXIX.	Alturas de la ciudades del modelo estadístico.....	119
XXX.	Datos para el modelo estadístico de temperaturas de ciudades y temperaturas de infraestructuras sin techo verde y con techo verde..	121
XXXI.	Resultados para el modelo de regresión para las temperaturas y alturas tabuladas.....	132
XXXII.	Resultados para el modelo de regresión para las temperaturas y altura de la ciudad de Guatemala.....	134
XXXIII.	Costos de preinstalación del techo verde por m ²	139
XXXIV.	Costos de materiales básicos del techo verde por m ²	140

XXXV.	Costos de mantenimiento de un techo por m ²	142
XXXVI.	Costos de consumo mensual (por unidad).....	143
XXXVII.	Costos de instalación de techo verde (152 mt ²).....	145
XXXVIII.	Costos de instalación de sistema de aire acondicionado (152 mt ²) ..	147

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Σ	Sumatoria
°	Un grado sexagesimal es el ángulo central subtendido por un arco cuya longitud es igual a 1/360 de la circunferencia. Es la nonagésima (1/90) parte de un ángulo recto
°C	Grado Celcius
°F	Grado Fahrenheit
%	Porcentaje
BTU	<i>British Thermal Unit</i>
cm	Centímetro
C₆H₁₂O₆	Glucosa
CO₂	Dióxido de carbono
dB	Decibel

g	Gramos
H₂O	Agua
Hz	Hercio
h.r	Humedad relativa
Kcal	Kilocaloría
Kg	Kilogramo
Kj	Kilo Joule
KN	Kilo newton
kPa	Kilo pascal
kWh	Kilo Watt hora
l	litros
m	Metro
m²	Metro cuadrado
MJ	Mega Joule

pH	Coeficiente que indica el grado de acidez de una disolución
PH	<i>Horse Power</i> (caballos de potencia)
Q	Quetzal, moneda oficial de la república de Guatemala
V	Voltio
W_v	Carga viva uniformemente distribuida

GLOSARIO

AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
Altitud	La altitud es la distancia vertical a un origen determinado, considerado como nivel cero, para el que se suele tomar el nivel medio del mar.
Autoconsumo	Consumo de bienes o recursos, especialmente agrarios, por parte de quien los produce.
Azotea	Parte superior de un edificio cuando este es plano.
Biodiversidad	Amplia variedad de seres vivos sobre la tierra y los patrones naturales que la conforman.
Bituminoso	Sustancias de color negro, sólidas o viscosas, dúctiles, que se ablandan por el calor y comprenden aquellos cuyo origen son los crudos petrolíferos como también los obtenidos por la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso.
Blog	Sitio web que incluye, a modo de diario personal de su autor o autores, contenidos de su interés, actualizados

con frecuencia y a menudo comentados por los lectores.

Compost	Fertilizante compuesto de residuos orgánicos (desechos domésticos, hierbas, deyecciones animales, etc.), tierra y cal.
Conato	Inicio de una acción que se frustra antes de llegar a su término.
CONRED	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres de Guatemala.
Constante de Stefan-Boltzmann	Una constante física simbolizada por la letra griega σ , es la constante de proporcionalidad en la ley de Stefan-Boltzmann, donde la intensidad (física) total irradiada se incrementa a medida que aumenta la temperatura de un cuerpo negro que es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura termodinámica.
Efecto de isla	Situación urbana, de acumulación de calor por la inmensa mole de hormigón, y demás materiales absorbentes de calor; y atmosférica que se da en situaciones de estabilidad por la acción de un anticiclón térmico.
Emitancia	Cantidad de flujo luminoso que emite una superficie por unidad de área.

Evapotranspiración	Cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y de la transpiración de las plantas.
Fertilización	Proceso a través del cual se preparará a la tierra añadiéndole diversas sustancias que tienen el objetivo de hacerla más fértil y útil a la hora de la siembra y la plantación de semillas.
FOVAPI	Fondo para la vivienda en Guatemala.
Geosintético	Producto sintético utilizado para estabilizar terreno. Por lo general, es un producto poliméricos utilizado para resolver problemas de ingeniería civil.
<i>Green Roof</i>	Techo verde.
GGBC	<i>Guatemala Green Build Council</i> (Consejo de construcciones verdes de Guatemala).
<i>German Landscape Research, Development & Construction Society</i>	Desarrollo de la investigación del paisaje y de la sociedad de construcción alemana.
<i>Hypalon</i>	Polietileno Clorosulfonado. Caucho sintético, producto de la reacción de clorosulfonación de polietileno.

Implementación	Realización o la ejecución de un plan, idea, modelo científico, diseño, especificación, estándar, algoritmo o política.
Impermeable	Que no permite el paso de la humedad, el agua u otro líquido.
<i>Index Seminum</i>	Procedente del latín, quiere decir "índice de semillas" a un catálogo de semillas en formato 14,6 x 21 cm. (A5), que preparan los jardines botánicos de las semillas que tienen disponibles ("banco de germoplasma") de las plantas que albergan, y que se ofrece anualmente a los jardines botánicos de todo el mundo (más de 1000 instituciones de 48 países), con la intención de establecer un intercambio libre y gratuito.
INFONAVIT	Instituto de Fondo Nacional de la Vivienda de los Trabajadores de México.
Latitud	Distancia angular entre la línea ecuatorial, y un punto determinado de la Tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto. Se abrevia lat. Según el hemisferio en el que se sitúe el punto, puede ser latitud norte o sur.
Longitud	Abreviadatura: long. En cartografía, expresa la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano que se tome como 0° (es decir

el meridiano de base) medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto, una circunferencia cuyo centro es la intersección del eje de la tierra con el plano del citado paralelo. En la actualidad el meridiano base es el meridiano de Greenwich (observatorio de Greenwich).

NSE	Normas de seguridad estructural emitidas por AGIES.
NRD	Normas de Seguridad emitidas por CONRED.
Polietileno	Polímero preparado a partir de etileno.
Poliéster	Resina plástica que se obtiene mediante una reacción química y que es muy resistente a la humedad y a los productos químicos.
Poliestireno	Resina sintética que se emplea, principalmente, en la fabricación de lentes plásticos y aislantes térmicos y eléctricos.
Polímero	Macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena.
Poliuretano	Polímero que se obtiene mediante condensación de bases hidroxílicas combinadas con diisocianatos.

Propileno	Gas incoloro que se obtiene del petróleo y que se emplea en la producción de plásticos.
PVC	Policloruro de vinilo, producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo.
Ralentizar	Hacer más lenta una actividad o proceso.
Resiliencia	capacidad de un ecosistema de absorber perturbaciones, sin alterar significativamente sus características de estructura y funcionalidad.
RG	Reglamento de construcción de la Municipalidad de Guatemala.
Riego	Consiste en aportar agua al suelo para que los vegetales tengan el suministro de agua que necesitan, favoreciendo así su crecimiento.
<i>Rooftop Garden</i>	Jardín de techo.
SDA	Secretaria Distrital de Ambiente de Venezuela.
Sintético	Elemento químico que no aparece de forma natural en la tierra, y solo puede ser creado artificialmente.
Sostenible	Equilibrio de una especie con los recursos de su entorno.

Suculentos	Las plantas en las que la raíz, el tallo o las hojas se han engrosado para permitir el almacenamiento de agua en cantidades mucho mayores que en el resto de las plantas.
Sustrato	Capa de suelo debajo de la capa superficial de la tierra. Es un medio para cultivar plantas, hierbas y verduras en una maceta o recipiente duradero.
Termoplástico	Que se ablanda por la acción del calor y se endurece al enfriarse, de forma reversible.
Techo verde	Construcciones hechas en la parte superior de cualquier edificio o estructura, en el cual se pone un soporte que va a ayudar a la colocación de la plantación de distintos tipos de vegetación.
Urbano	Perteneciente o relativo a la ciudad.
WGRI	<i>World Green Roof Infrastructure Network</i> (Red mundial de infraestructura de techo verde).

RESUMEN

El aumento acelerado y desordenado de las urbes en Guatemala no ha permitido que se diseñen ciudades adecuadas al mantenimiento del ecosistema y de la biodiversidad de los espacios que se destinan para estas, en donde los fenómenos como el efecto de isla, son más evidentes y colaboran con el calentamiento global.

Los techos verdes son estructuras compuestas, las cuales tienen ocho capas incluyendo la estructura portante o el techo en donde se instalarán. Cada una de estas capas interactúa entre sí y ayuda a las capas de los extremos y a la capa de la estructura portante, a mantener su integridad, así como a la capa vegetal para que tenga el agua y el sustrato necesario sin que pierda sus propiedades en situaciones de saturación de agua.

Para el desarrollo del presente estudio de prototipos de techos verde se tomaron en cuenta variables que puedan ayudar a la recopilación de información que facilite su toma de datos, la integridad y seguridad de los prototipos, los cuales la ubicación es un factor importante. Se eligieron tres lugares que se encuentran dentro de las propiedades de la Universidad de San Carlos de Guatemala, estos son: Jardín Botánico-Herbario USCG-Index Seminum del Centro de Estudios Conservacionistas, Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur (ITUGS) y Edificio T-3, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Cada una de estas ubicaciones permite realizar un control en diferentes ambientes y micro-climas que enriquecerán la información por estudiar.

Para los prototipos que se instalarán en cada una de las ubicaciones anteriormente mencionadas, se diseñó una estructura de primera categoría (de paredes y techos de concreto prefabricado), la cual cumple con los requerimientos mínimos de construcción y su diseño permitirá monitorear, dentro del mismo, factores ambientales y tener un fácil acceso al techo para observar y monitorear los cambios en cada capa respecto de las inclemencias del ambiente, y de la construcción e instalación de cada una de las capas del techo verde en los prototipos.

Para la determinación de los beneficios de la implementación de un techo verde se realizó un modelo estadístico inferencial, en el cual se hizo una comparación de estudios previos de implementación de techos verdes en diferentes ciudades de Latinoamérica (México, Venezuela y Colombia), en donde por medio una regresión lineal de matrices, se determinó la reducción de la temperatura en estructuras potenciales en las condiciones climáticas de Guatemala.

Los beneficios de implementar un techo verde en una estructura, en donde el beneficio ecológico es implícito, el beneficio e impacto en el ahorro energético, económico y un potencial beneficio en la vida de las personas que habiten dentro de edificaciones que cuenten con un techo verde es alto en comparación con los métodos tradicionales de reducción de temperatura dentro de las edificaciones. Estos beneficios pueden ser medidos con mejor detalle en la construcción e instalación de prototipos de techos verdes, cuentan con información detallada y realizada dentro de la realidad del ambiente y clima en Guatemala.

OBJETIVOS

General

Diseñar e implementar prototipos de techos verdes.

Específicos

1. Analizar las ventajas y desventajas de la implementación de los techos verdes en edificaciones comunes en Guatemala.
2. Establecer los elementos necesarios para la implementación de techos verdes en Guatemala.
3. Definir los requerimientos técnicos mínimos para la implementación de techos verdes.
4. Asignar las especificaciones de las áreas en donde serán instalados los techos verdes.
5. Fijar los elementos que permitan el mantenimiento de los techos verdes.

INTRODUCCIÓN

Parte del contenido de la Declaración de Yamusukro de la Unesco del 1 de julio de 1989, afirmaba que: “La paz es también una asociación armoniosa entre la humanidad y el medio ambiente”. La convivencia entre las personas y su ambiente tiene que ser una relación que permita un beneficio para ambas partes, el crecimiento desmedido y falta de planificación de las ciudades rompe con este principio, el cual la construcción de edificaciones de concreto van ganando espacio al contrario de la vegetación y la biodiversidad de los espacios donde las ciudades se instalan.

Los efectos que estas edificaciones conllevan son solucionar necesidades de espacio para la vivienda y capacidad instalada de industrias y empresas, pero esto trae consigo problemas adversos como los efectos de isla, falta de agua, disminución de la calidad de aire, entre muchos otros factores que disminuyen así la calidad de vida de las personas como las plantas y animales que viven dentro de las ciudades.

Las soluciones que se han implementado alrededor del mundo son implementaciones de espacios verdes, más conocidos como techos verdes en Europa y algunos países de Latinoamérica la implementación de estos espacios son considerados obligatorios, los cuales ya existe una legislación exclusiva para la implementación de techos verdes.

En Guatemala, aun no se cuenta con una legislación que exija que se implementen techos verdes o espacios verdes en la ciudad; no se cuentan con estudios formales y se realiza un modelo estadístico matemático, en donde se comprueba teóricamente la hipótesis de que la implementación de un techo verde en Guatemala, reducirá en un inmueble o edificación por lo menos 3°C en la

temperatura interna y que la implementación de un sistema de techo verde significará un ahorro, tanto económico y energético a largo plazo en comparación de la instalación de un sistema de aire acondicionado, agregando a esto beneficios al ecosistema de las ciudades, como la reducción de la temperatura ambiental, la limpieza del aire, la aportación del aumento de la humedad relativa del ambiente. Se propone un modelo para un prototipo que pueda ayudar a tener un ambiente controlado y así poder realizar las mediciones y contar con un estudio formal sobre el comportamiento de la temperatura dentro de la estructura.

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Marco teórico

1.1.1. Eficiencia energética

Es el hecho de minimizar la cantidad de energía necesaria para satisfacer la demanda sin afectar a su calidad; supone la sustitución de un equipo por otro que, con las mismas prestaciones, consuma menos electricidad. No supone, por tanto, cambios en los hábitos de consumo (el comportamiento del usuario sigue siendo el mismo), pero se consume menos energía ya que el consumo energético para llevar a cabo el mismo servicio es menor.

Eficiencia energética es, por ejemplo, utilizar una lavadora de “clase energética A” (la que menos consume) en lugar de una lavadora de “clase energética G” (la que más consume). No se cambia la pauta de consumo, se sigue lavando lo mismo (asiduidad, programa de lavadora), pero se consume menos energía; se logra un ahorro porque, haciendo lo mismo, una lavadora de clase energética A consume menos que una de clase G¹.

La aplicación de techo verde es un claro ejemplo de eficiencia energética ya que no se cambian los hábitos de consumo pero si cambiara la forma en que ese consumo se realizará ya que se reducirán la necesidad de implementar sistemas de aire acondicionado para reducir la temperatura dentro de una edificación, la forma en que esto puede realizarse se desarrollará a lo largo del presente documento.

¹ SCHALLENBER, Julieta; et al. *Energías renovables y eficiencia energética*. p.122.

1.1.2. Techos verdes

Son conocidos con muchos nombres (techos ecológicos, techos con vegetación, techos verdes, pero todos se refieren a cubiertas de cualquier tipo, modificadas para soportar vegetación en su superficie. Los techos verdes se construyen con el fin de contribuir a un medio urbano más sostenible.²

Un techo verde son conocidos también como azotea viva, azotea ajardinada, consiste en un sistema integral compuesto por varias capas de materiales diseñados para proteger al inmueble contra daños ocasionados por la exposición al medio ambiente, y promover el crecimiento de vegetación en techos, terrazas y áreas abiertas poco utilizadas.³ “Ya sean superficies planas o tejados con cierta inclinación”.⁴

“Los techos verdes son construcciones hechas en la parte superior de cualquier edificio o estructura, en el cual se pone un soporte que va a ayudar a la colocación de la plantación de distintos tipos de vegetación.”⁵

En el concepto de techo verde todos coinciden en tener una cubierta o superficie vegetal en la parte superior de una edificación. Para el presente documento se ha tomado el concepto de techo verde como una estructura diseñada que contenga elementos que ayuden a la edificación original a soportar

² LÓPEZ, Carlos. *Un acercamiento a las cubiertas verdes*. p.17.

³ MAYORGA, Andrea. *Aplicación arquitectónica de los geosintéticos en Guatemala (arquitectura paisajista, techos verdes y estabilización de suelos)*. p. 93.

⁴ RUDOLF, Franz; RUDOLF, Wolfgang. *Necesidad de maduración de gradas áreas edificadas*. p.1.

⁵ MARTINEZ, E; et al. *Azoteas verdes: la naturaleza más cerca del cielo*. <https://ecoxela.wordpress.com>. Consulta: julio de 2016.

la superficie vegetal, que contribuya a tener beneficios medio ambientales, sociales y económicos.

1.1.2.1. Tipos de techos verdes

Los tipos de techos verdes se pueden clasificar en varias categorías, estas categorías pueden depender elementos utilizados en su construcción, en esta puede estar la clasificación techos verdes donde sus elementos de construcción son más livianos ya que su función es ambiental y estética; jardines techo donde sus elementos de construcción son más robustos ya que su función es de simular un jardín para convivencia social.⁶

Otra categoría es por el espesor del sustrato por utilizar, en esta clasificación encontramos techos verdes intensivos (se podría considerar como techo verde o *green roof*); extensivos (en comparación a la anterior clasificación este se podría considerar como un jardín techo o *rooftop garden*),⁷ “y la semi-extensiva la cual es una combinación de las dos anteriores la diferencia es su mantenimiento y su vegetación por utilizar.”⁸

1.1.2.1.1. Techo verde extensivo

Este tipo de techo se caracteriza por ser un techo verde simple que puede asignarse tipos de vegetación o plantaciones simples y silvestres, el cual no requiere un tipo de mantenimiento dedicado, ya que no demanda un sistema de irrigación complejo, este puede ser hasta cierto punto natural, es muy

⁶ WERTHMANN, Christian. *Green Roof a case study*. p.55.

⁷ MINKE, Gernot. *Techos verdes: planificación, ejecución, consejos prácticos*. p. 25.

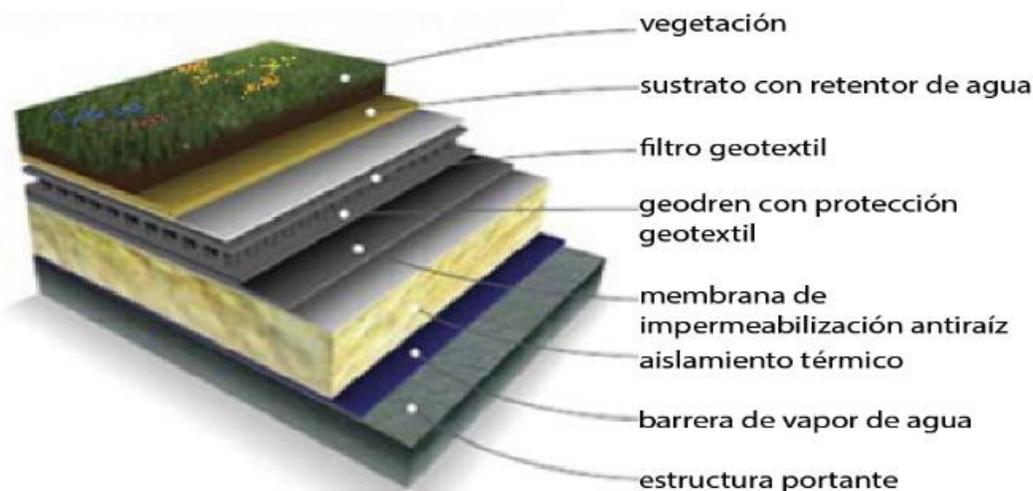
⁸ CRISTANCHO, N. *Techos verdes en Bogotá, una alternativa ambiental con beneficios técnicos*. p.42.

conveniente por su sencillez ya que su capa de sustrato es la más delgada entre los techos verdes.

A este tipo de techo se designa una plantación que crece naturalmente sin ser sembrada, que se las arregla con un escaso espesor de sustrato desde tres hasta 15 centímetros sin agua ni nutrientes, y forma una duradera y cerrada capa de pantas. Los pesos son menores a los 1,6 KN/m² (160 kg/m²). La vegetación de musgos, hierbas o pastos de diferente composición pueden sobrevivir sin cuidados y resistentes al calor y al frío. Generalmente se eligen plantas silvestres por su capacidad de regeneración, resistencia y adaptación.⁹

“El techo verde extensivo se caracteriza por precisar un mantenimiento muy reducido, que puede limitarse a dos o tres visitas de inspección y control al año.”¹⁰

Figura 1. **Sección de techo verde extensivo**



Fuente: AGUDELO, Paola; et al. *Techos verdes: menos gris, más verde*. p.8.

⁹ MINKE, Gernot. Op.cit. p. 28.

¹⁰ BISCIA, Reynaldo. *Qué es un techo verde: Beneficios de un techo verde*.
<http://www.techosverdes.com.ar>. Consulta: julio de 2016

1.1.2.1.2. Techo verde intensivo

Este tipo de techo se caracteriza por ser un techo verde más complejo y elaborado, ya que su vegetación es específica y requiere de cuidados dedicados, exige un sistema de irrigación complejo y de componentes en el sustrato que proporcione los nutrientes suficientes a la vegetación para su desarrollo. El techo verde intensivo se asemeja a un campo abierto o jardín a nivel de terreno, es por eso que el grosor del sustrato es mayor al de un techo verde extensivo, por lo cual su instalación y mantenimiento es más complejo comparado con un techo verde extensivo o semi intensivo. En la mayoría de los casos este tipo de techos requiere de un sistema de irrigación, y una fertilización especial, así como también de un cuidadoso mantenimiento; y dependiendo del tipo de plantas hasta pueden requerir de un sistema adicional de recolección de agua

“A este tipo de techo se designa una plantación vivaz de plantas leñosas y superficies de césped, que usualmente se encuentran en campo abierto. Es indispensable un espesor de sustrato de más de 30 cm; además de ser abastecidas regularmente con agua y nutrientes.”¹¹

Estos techos son comparables con un jardín de nivel de terreno natural el cual se puede considerar instalarlos en techos de poca pendiente de 1.5° a 2° hasta un máximo de 15° (ver el punto 2.2.2 Tipos de inclinación del techo), mediante el uso de sistemas de gestión del agua es posible plantar y hacer crecer la vegetación más exigente, incluso árboles. El mantenimiento es el mismo que el de un jardín tradicional, requiere riego, fertilización y mantenimiento. “Los medios de crecimiento son bastante profundos por lo general más de 30 cms.”¹².

¹¹ MINKE, Gernot. Op.cit. 25.

¹² BISCIA, Reynaldo. Op. cit.

“Este tipo de techo verde requiere un tipo de estructura de edificación adecuada para su instalación ya que por su compleja construcción y tipo de vegetación puede llegar a tener un peso en su estado no saturado de 12 KN/m² (1200 kg/m²).”¹³

Figura 2. **Sección de techo verde intensivo**



Fuente: AGUDELO, Paola; et al. *Techos verdes: menos gris, más verde.* p. 9.

¹³ MINKE, Gernot. *Ibíd.* p. 28.

1.1.2.1.3. Techo verde semi-intensivo

El techo verde semi-intensivo, combina los diseños de un techo verde extensivo y un intensivo, aprovechando las características de un techo intensivo de una sección más compleja con la versatilidad de un techo extensivo.

El techo verde semi-intensivo divide la carga de acuerdo a las características estructurales del inmueble. En este tipo de techo se puede eliminar algunas capas del techo de tipo intensivo y elementos de sistemas independientes tales como los sistemas de irrigación dedicados.

“Se compone de algunos suculentos de las familias tipo extensivo, mezclado con arbustos pequeños y plantas aromáticas. La cubierta semi-intensiva permite formar la plantación a gusto del cliente. Los medios de crecimiento por lo general de 15 a 20 cm de profundidad.”¹⁴

Figura 3. **Sección de techo verde semi-intensivo**



Fuente: AGUDELO, Paola; et al. *Techos verdes: menos gris, más verde*. p. 10.

¹⁴ BISCIA, Reynaldo. *Ibíd.*

1.1.3. Antecedentes

1.1.3.1. Techos verdes en el mundo

Los techos verdes su origen datan desde hace más de dos mil años, Babilonia era famosa por sus jardines colgantes, en la edad media donde se utilizaban sin ninguna preparación previa, edificaciones que aún se encuentran en pie con éste tipo de techos datan del siglo IX y están situadas al norte de Europa la mayoría en el área de Islandia. La necesidad de implementar este tipo de techo fue de necesidad de implementación de estructuras de habitación ya que en el área solo se contaba con piedras grandes y la madera que se utilizaba para la estructura era escaso y tenían que recorrer largas distancias para obtenerla, así sobre ésta se disponía un techo de césped.

A continuación, se incluye una extensa cita tomada de LEE, Hye Min. *History of Green roofs the urban heat island effect*. “Los primeros registros son en 1810, un químico de Gran Bretaña, Luke Howard, descubre el efecto de isla de calor urbano. Llega a la conclusión de que la población y la estructura de los edificios retienen más calor en la ciudad que en las áreas urbanas.

En Estados Unidos en 1931 se cuenta con el primer techo verde moderno, instalado en el Rockefeller Center, Nueva York. Desarrollado y Construido por John R. Toody y Raymond Hood respectivamente.

En Alemania en 1961, Reinhard Bornkamm investigador de la Universidad Libre de Berlín, quien es conocido internacionalmente como el padre de los techos verdes modernos, publicó su trabajo sobre techos verdes en Alemania y marcó el comienzo de la investigación moderna de tecnologías verdes.

En Alemania en 1970, GENO Haus es un techo verde patrocinado y construido por el gobierno alemán el cual estuvo en funcionamiento hasta 1990. Estaba hecho de una base de espuma de poliestireno.

En 1971 también en Alemania Gerda Gollwitzer y Werner Wirsing, pioneros de la tecnología de techos verdes publican su trabajo techos Áreas habitadas de los techos, transitables y cubiertas por vegetación donde se describe el concepto moderno de techo verde.

“En 1975 *The German Landscape Research, Development & Construction Society*, es fundada y establece las normas para techos verdes que es un punto de partida y la herramienta básica para la construcción de techos verdes fiables.

En 1986 en Viena, Austria, *Hundertwasser* construye un edificio de apartamentos que cuenta con césped, plantas, flores y árboles que cubren el techo, así como las paredes y balcones. Su infraestructura verde es reconocida como punto de referencia.

En 1989 en Alemania un millón de metros cuadrados de techos verdes son instalados en sus edificaciones.

En 1993 en Dietikon, Suiza el arquitecto Peter Vetsch construye nueve construcciones residenciales donde las cubre completamente con hierba a excepción de las entradas. Algunos tejados de la casa se utilizan como jardines, mientras que otros simplemente como áreas de descanso.

En 1995 en Fukuoka, Japón, Emilio Ambasz, arquitecto estadounidense nacido argentino, transpone un parque de 100,000 pies cuadrados en el centro de la ciudad en 15 terrazas en un nuevo edificio de gobierno El jardín de la azotea forma una escalera y es una hermosa yuxtaposición de la naturaleza y la ciudad.

En 1996 en Alemania se instalan diez millones de metros cuadrados de techos verdes debido a la política de gobierno y legislación estatal que animan a la infraestructura ecológica verde.

En 1998 en *Washington*, DC, El Consejo de Construcción Verde crea la Jefatura en Energía y Diseño para el Medio Ambiente, diseñado por un sistema de puntuación: Techos verdes pueden contribuir a un máximo de seis puntos en un sistema de sesenta y nueve puntos.

En 1999 en Toronto, Canadá, Steven W. Peck forma Techos verdes para Ciudades Saludables, diseñada para promover la aplicación de los techos verde en América del Norte por organizaciones públicas y privadas.

En 2000 en Toronto, Canadá, un estudio demostró una disminución de 5°C a 2°C en la temperatura de una infraestructura de techo verde.

En 2002 en *New York*, el informe final de la ciudad de Nueva York, incluye los resultados de pruebas que demuestran los techos verdes, una estrategia como mitigación de el efecto de isla de calor, reduciendo directamente las temperaturas superficiales de los edificios de *New York*.

En 2003 en *New York*, Rafael Pelli y Diana Balmori diseñó el primer edificio residencial sustentable en América del Norte el *Solaire*, que incluye dos cubiertas verdes.

En 2004 el *Millennium Park* en Chicago es el mayor jardín de techo verde en el mundo. El parque se extiende más de 25.4 acres de parques subterráneos.

“En 2006 una investigación en *New York* demuestra que la infraestructura de techo verde podría reducir las temperaturas medias de la superficie en la ciudad de New York de 1.4°F (0.8°C) si el 50% de los tejados planos de la ciudad es vegetalizada.

En 2008 la Torre del *Bank of America* en *New York* es el edificio de oficinas de gran altura primera *LEED Platinum*, el cual incluirá un techo verde de 4,500 pies cuadrados.

En 2008 en Australia se funda la Red Mundial de Techos Verdes (*World Green Roof Infrastructure Network WGRIN*) donde se funda con 7 países miembros donde se encuentra México el primer registro de un país latinoamericano en el ámbito de techos verdes.

“En 2009 en Toronto, Canadá se realiza el primer congreso de techos verdes *Cities Alive - World Green Infrastructure Congress*”.¹⁵

“En 2009 en Colombia se decreta la ley 418 de 2009 Por el cual se promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables, como techos o terrazas verdes, entre otras en el D. C. y se dictan otras disposiciones.”¹⁶

¹⁵ WILSON, Geoff. *Eleven countries are now members of World Green Roof Infrastructure Network*. <http://www.worldgreenroof.org>. Consulta: julio de 2016.

¹⁶ Ley de techos verdes en Bogotá. <http://ecotelhado.com.co>. Consulta: julio de 2016.

“En 2010 en la ciudad de México se realiza el primer congreso de techos verdes realizado por el *World Green Roof Infrastructure Network (WGRI)*, el primero de esta naturaleza en Latino América.”¹⁷

En 2011 en Colombia, Carolina Forero El proyecto surgió con Carolina Forero, una ecóloga de la Universidad Javeriana, quien planteó esta iniciativa en su trabajo de tesis. Ahora, con la Fundación Catalina Muñoz, les enseña a los habitantes de la zona a implementar ecotechos que, a diferencia de los techos verdes, se caracterizan por un enfoque más comunitario.¹⁸

“En 2011 en la ciudad de México se termina de instalar un techo verde en el edificio del Instituto de Fondo Nacional de la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT) con un área de 5mil 265 metros cuadrados convirtiéndose en la tercer techo verde más grande de América.”¹⁹

“En 2011 en Caracas, Venezuela el edificio de la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA), es el primer edificio oficial que tiene techo verde, con un área de 1,300 metros cuadrados.”²⁰

En 2012 en Colombia, decreta el proyecto ley 119 donde se otorgan beneficios tributarios para las construcciones ambientales sostenibles, en donde se benefician los proyectos de desarrollo y construcción de techos verdes.

¹⁷ WILSON, Geoff. *Eleven countries are now members of World Green Roof Infrastructure Network*. <http://www.worldgreenroof.org>. Consulta: julio de 2016.

¹⁸ BERMÚDEZ, Estefanía. *Techos verdes para rescatar la ciudad*. <https://www.elespectador.com>. Consulta: julio de 2016.

¹⁹ PÉREZ, Monserrat. *La azotea verde más grande de Latinoamérica*. <https://www.veoverde.com>. Consulta: julio de 2016.

²⁰ El tiempo. Bogotá ya tiene su primer edificio público con techo verde. <http://www.eltiempo.com>. Consultado: julio de 2016

1.1.3.2. Techos verdes en Guatemala

En Guatemala la información sobre estudios realizados en infraestructuras y tecnologías de techos verdes es deficiente, no se cuentan con estudios formales sobre techos verdes, en relación a sus beneficios, construcción o cualquier otra información al público en general.

El único estudio que se relaciona con los techos verdes es el estudio realizado por la Arquitecta Andrea Elizabeth Mayorga Garrido en su trabajo de tesis titulado *Aplicación arquitectónica de los geosintéticos en Guatemala (Arquitectura paisajista, techos verdes y estabilización de suelos)*, la cual contiene información general sobre techos verdes, sus posibles beneficios en la implementación y como se pueden aplicar los geosintéticos a los techos verdes.

Adicionalmente, se cuentan con información publicada en foros o *blogs* donde se comenta sobre las tecnologías de techos verdes y sus posibles beneficios al clima local.

En 2011 se funda el *Guatemala Green Building Council (GGBC)*, es una organización no lucrativa que promueve estrategias sostenibles, quienes dan soporte a empresas que instalan techos verdes en Guatemala.

En Guatemala, si se instalan techos verdes, es porque son considerados más como un atractivo inmobiliario que un mejoramiento a las condiciones ambientales de Guatemala.

1.1.4. Ventajas

Las ventajas de los techos verdes varían según el autor, haciendo una recopilación de los beneficios, todos los autores revisados para este trabajo, y que se citan en la bibliografía, coinciden en que las ventajas pueden ser económicas, ambientales y resiliencia.

1.1.4.1. Ventajas económicas

En la implementación de un techo verde se consideran las siguientes ventajas económicas:

- Reduce los costos de mantenimiento e impermeabilización del techo de concreto armado.
- Reduce de los costos de instalación y/o mantenimiento de aire acondicionado del edificio por la reducción de la temperatura manteniendo el interior fresco.
- Incremento del valor comercial de los inmuebles ya sean residenciales, oficinas, hoteles e inmuebles de recreación.
- Aplicaciones de producción de alimentos productivos específicos para el autoconsumo.
- Permite la reutilización de materiales de construcción para su instalación en las estructuras.
- En caso de un incendio o conato de incendio el techo verde ralentiza el avance del fuego en un siniestro.

1.1.4.2. Ventajas ambientales y resiliencia

Las ventajas ambientales en la implementación de techos verdes son:

- Dentro de los inmuebles donde se instalan los techos verdes permiten la regulación térmica ya que reduce la temperatura en temporadas de calor y mantiene la temperatura interna en temporadas de frío.
- Disminución efecto isla de calor en las ciudades donde se implementan los techos verdes.
- Retención de agua en el sustrato del techo verde y regulación de descarga del agua de lluvia.
- Producción de oxígeno, captación de carbono y mejora calidad de aire en el área de instalación de los techos verdes
- Aislamiento acústico del ruido externo de los inmuebles donde se instalan los techos verdes.
- Conectividad biológica y ecológica por la creación de pequeños nuevos hábitats en las ciudades y aumento en la biodiversidad local.

Las ventajas de resiliencia en la implementación de techos verdes:

- Reconstitución del paisaje natural dentro de las ciudades
- Crean espacios de recreación para los habitantes o la población en general.
- Aprovechamiento de espacio marginal (espacio muerto o abandonado) donde se pueden crear ambientes de recreación.
- Su uso puede extenderse a cualquier edificio público, privado, colegios, conjuntos residenciales y zonas críticas de la ciudad.
- Responsabilidad ambiental de todos los involucrados directa o indirectamente en la instalación de los techos verdes.

2. ESTRUCTURA DEL TECHO VERDE

Para este capítulo se describirán los componentes de un techo verde extensivo, como habíamos definido anteriormente un techo verde extensivo se caracteriza por precisar un mantenimiento muy reducido, que puede limitarse a dos o tres visitas de inspección y control al año. “Tiene una profundidad típica de 7.5 cm a 15 cm.”²¹ “Capas de crecimiento de vegetación arriba de un sistema de cubierta tradicional. Su mantenimiento es bajo, el espesor no debe ser mayor a los 8 cm, con un carga permanente entre los 110 y 140 kg/m² en estado saturado.”²²

Se elegirá este tipo de techo verde ya que tanto como en su estructura, mantenimiento y carga total son las menores en comparación de los otros tipos (semi-intensivos e intensivos). Para la descripción de cada uno de los elementos se tomará como base el estudio realizado por Irais Guadalupe Sánchez Mora en su trabajo de tesis *Manual para el Diseño e Instalación de una azotea verde*; este estudio presenta las condiciones mínimas para la instalación y las regulaciones mundiales y regionales en Latinoamérica en materia de techos verdes.

2.1. Componentes y elementos de un techo verde

El techo verde es un sistema integral conformado por varias capas de diferentes materiales, dispuestos para proteger el inmueble contra daños por la exposición al medio ambiente y a su vez promover el crecimiento de vegetación. El instalar un techo verde reemplaza cualquier acabado que pudiera tener el techo.²³

²¹ BISCIA, Reynaldo. Op. Cit.

²² SANCHEZ, Irais. *Manual para el diseño e instalación de una azotea verde*. p. 33.

²³ SÁNCHEZ, Irais. *Manual para el diseño e instalación de una azotea verde*. p. 34.

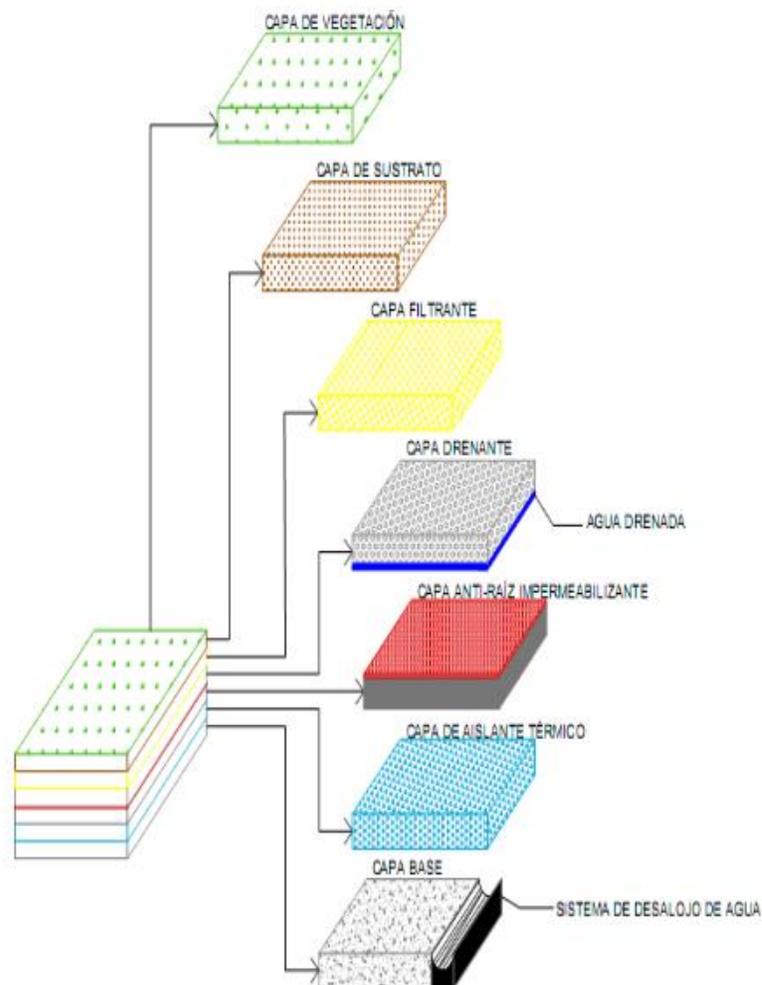
“Un techo verde está compuesta por las siguientes capas, el orden en que se en listan es de manera ascendente, es decir, de la parte inferior a la superior durante el proceso de instalación.”²⁴ En la figura 4 se muestra con mayor detalle la estructura general de un techo verde.

- Soporte estructural: es el techo de la estructura en donde se instalará el techo verde, esta está ligada a la infraestructura del inmueble.
- Sistema de desalojo de agua: es el sistema de desagüe de la infraestructura del inmueble
- Aislante térmico: es la capa que permitirá transferir el calor de y hacia el soporte estructural al techo verde.
- Membrana anti-raíz, impermeabilizante: es la protección que no permitirá que las raíces de la capa de vegetación ni el agua traspasen al aislante térmico.
- Capa drenante: es un sistema que permitirá que el exceso de agua del sustrato saturado sea drenada correctamente.
- Capa filtrante: Es la capa que filtrará el agua para que cuando llegue a la capa drenante no contenga elementos de la capa de vegetación y la capa de sustrato.

²⁴ Ibid.

- Capa de sustrato: Es la capa que contiene la tierra y los elementos nutricionales para que la capa de vegetación crezca saludablemente.
- Capa de vegetación: La primera capa que está en la superficie que es la que contiene toda la vegetación a utilizar dependiendo del tipo de techo que se implemente.

Figura 4. **Sección capas que componen un techo verde**



Fuente: SANCHEZ, Irais. *Manual para el diseño e instalación de una azotea verde*. p. 45.

2.1.1. Soporte estructural o capa base

Para el soporte estructural o capa base, en este estudio se tomará como referencia las especificaciones solicitadas por la legislación guatemalteca. Las especificaciones que exige la municipalidad de Guatemala en el RG-1 “plan Regulador, Reglamento de Construcción de la Ciudad de Guatemala”, AGIES NSE 2-10 “demandas estructurales, Condiciones de sitio y niveles de protección”, AGIES NSE 4-10 “Requisitos Prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles”, NRD1 “Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la república de Guatemala”, NRD3 “Especificaciones técnicas para materiales de construcción” y “Manual de especificaciones técnicas construcción de vivienda y urbanizaciones fondo para la vivienda FOPAVI”.

Se debe considerar que los pesos que soportará el techo donde se instalará el techo verde dependerán del tipo de techo a implementar y se debe de verificar que la estructura pueda soportar las cargas establecidas.

Dentro del “Plan Regulador, Reglamento de Construcción de la Ciudad de Guatemala”, AGIES NSE 2-10, se encuentran los parámetros de soporte de carga para las construcciones de techos o cubiertas pesadas según la siguiente tabla:

Tabla I. **Cargas vivas de uso frecuente**

Tipo de ocupación o uso	Wv (Kg/m ²)
Cubiertas pesadas (inciso 3.3 (f))	
Azoteas de concreto con acceso	200
Azoteas sin acceso horizontal o inclinadas	100
Azoteas con inclinación mayor de 20°	75 (Sobre proyección horizontal)
Cubiertas usadas para jardín o para reuniones	500

Fuente: Plan Regulador, *Reglamento de Construcción de la Ciudad de Guatemala*, AGIES NSE

2-10. P. 7.

2.1.2. Sistema de desalojo de agua o caídas de agua

Para el sistema de desalojo de agua o caídas de agua, en este estudio se tomara como referencia las especificaciones solicitadas por la legislación guatemalteca. RE-9 “Reglamento específico de construcción de edificaciones en áreas residenciales del municipio de Guatemala”, AGIES NSE 2-10 “Demandas estructurales, Condiciones de sitio y niveles de protección”, AGIES NSE 4-10 “Requisitos Prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles”, “Manual de especificaciones técnicas construcción de vivienda y urbanizaciones fondo para la vivienda FOPAVI”.

Las especificaciones que deben cumplir las edificaciones o un techo para un sistema de desagüe adecuado serán las siguientes:

- En el diseño estructural de cubiertas se deben considerar los efectos de agua empozada.
- El agua empozada se produce por obstrucción de los sistemas de drenaje de la cubierta, el cual puede ocurrir debido a residuos, hojas de árboles o granizo, entre otras fuentes de obstrucción.
- Cada porción de un techo será diseñado para soportar la carga de toda el agua “R” que se acumulará a causa de lluvia sobre ella si el sistema de drenaje primario para esa porción está tapado, más la carga uniforme causada por agua que asciende por encima de la entrada del sistema de drenaje auxiliar en su flujo de diseño.
- Carga de lluvia sobre techo no deformado.

$$R = 0.0098(ds + dh)$$

Donde, R es la carga de lluvia sobre el techo no deformado, en kPa; d_s es la profundidad de agua sobre el techo no deformado hasta la entrada del sistema de drenaje secundario cuando el sistema de drenaje primario está bloqueado, en mm; d_h es la profundidad de agua adicional sobre el techo no deformado por encima de la entrada del sistema de drenaje secundario en su flujo de diseño, en mm.

- En el techo no deformado, no se consideran las deformaciones a causa de cargas (incluyendo cargas permanentes) cuando se determina la cantidad de lluvia sobre el techo.
- Inestabilidad por estancamiento: el estancamiento se refiere a la retención de agua debida únicamente a la deformación de techos relativamente planos. Los techos con una pendiente menor al 2% serán investigados mediante un análisis estructural para asegurar que posean la rigidez adecuada para excluir la deformación progresiva (es decir inestabilidad) conforme la lluvia cae sobre ellos. La carga de lluvia será utilizada en este análisis. El sistema de drenaje primario dentro de un área sujeta a estancamiento será considerado como obstruido en este análisis.
- Drenaje controlado: los techos equipados con mecanismos para controlar el ritmo del drenaje serán equipados con un sistema de drenaje secundario a una elevación mayor, que limite la acumulación de agua en el techo por encima de esa elevación. Dichos techos serán diseñados para sostener la carga de toda el agua de lluvia que se acumulará en ellos hasta la elevación del sistema de drenaje secundario, más la carga uniforme causada por el agua que se eleva por encima de la entrada del sistema de drenaje secundario.

2.1.3. Aislamiento térmico

“La capa de aislante térmico tiene como función disminuir la temperatura del inmueble en época de verano y elevar la temperatura del inmueble en época de invierno.”²⁵

En el mercado existen, actualmente, soluciones prácticas y el precio variará según el tipo de material por utilizar y su calidad para el aislamiento térmico, en los cuales se puede encontrar:

- Poliuretano con cubiertas de fibra de vidrio: es una membrana con fibras de vidrio incorporadas en su formulación, monocomponente, libre de disolventes, de aplicación en frío, elástica y resistente a los rayos UV. Resistente a los rayos UV y resistente al amarilleamiento y al envejecimiento.

Sus características son:

- Elástica y puenteo de fisuras.
- Libre de disolventes.
- Monocomponente.
- Fácil aplicación con rodillo incluso cuando la accesibilidad sea limitada.
- Membrana impermeabilizante continua.
- Permeable al vapor de agua.

²⁵ SANCHEZ, Irais. Op. cit. p. 47.

Figura 5. **Poliuretano con cubiertas de fibra de vidrio**



Fuente:

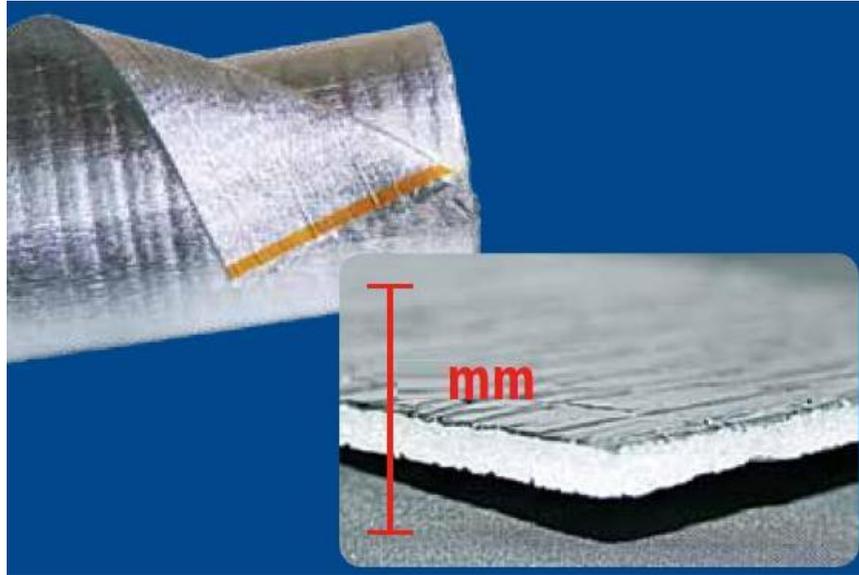
<http://g02.s.alicdn.com/kf/HTB1XblMHVXXXXbJXFXXq6xXFXXX4/200851734/HTB1XblMHVXXXbJXFXXq6xXFXXX4.jpg>. Consulta: septiembre de 2016

- Espuma de polietileno de celda cerrada laminada en aluminio: es un aislante térmico reflectivo desarrollado diseñado para ahorrar energía eliminando el calor radiante que emiten los techos, pisos o paredes dentro de las construcciones.

Sus características son:

- Estructura de polietileno en celda 100% cerrada
- Impermeable al agua
- Resistente a la formación de hongos
- Barrera de vapor
- Densidad de 20 - 30 kg / m²
- Emitancia de 0.03
- No promueve la generación de hongos o bacterias

Figura 6. **Espuma de polietileno laminada en aluminio**



Fuente: http://lamitecmex.com.mx/productos/img_home/prodex%20ad5f-ft.jpg. Consulta: septiembre de 2016

- Poliestireno extruido: es un aislante de espuma rígida, de carácter termoplástico y de estructura celular cerrada de canto escalonado. Sus características son:
 - Impermeable al agua
 - Alta resistencia a la deformación
 - Resistencia a la compresión
 - Resistente al fuego
 - Estabilidad dimensional
 - Tracción de la superficie
 - Transmisión del vapor de agua

Figura 7. **Poliestireno Extruido**



Fuente: <http://www.grupovalero.com/rs/188/3ce71790-e9a8-4d64-9bd1-29c58c22d5e6/6db/filename/extruido.jpg>. Consulta: septiembre de 2016

2.1.4. Membrana antiraíz impermeabilizante

La colocación de la membrana antiraíz impermeabilizante es necesaria, ya que tiene como función evitar el paso de agua que puede filtrarse de la capa drenante, así como evitar el paso de la raíz al aislante térmico, posteriormente, al soporte estructural.

Esta membrana deberá contar en su totalidad con las siguientes características:

- Resistencia al punzonamiento
- Resistencia a tensión
- Estabilidad en cada una de sus direcciones
- Resistencia ante microorganismos
- Resistencia a cambios de temperatura

- Resistencia a los rayos ultravioleta

Existen varios tipos de membrana anti-raíz, tales como:

- Bituminosa, la cual debe contar con un espesor mínimo de 4 milímetros y un refuerzo de poliéster de 180 gramos por metro cuadrado.
- PVC, Hypalon, propileno, etileno, mismos que deberán de contar con un espesor mínimo de 1.2 milímetros, y deberán de contar con 2 capas antipunzonantes.
- Polietileno, el cual cuenta con alta resistencia, pero no en uniones.²⁶

En el mercado aún no se encuentran todas las opciones dedicadas a las aplicaciones de techos verdes, pero existen soluciones prácticas que en este estudio se tomarán, como la mezcla de pinturas bituminosas, con un refuerzo de tela de poliéster no tejido.

Figura 8. Aplicación de una pintura bituminosa

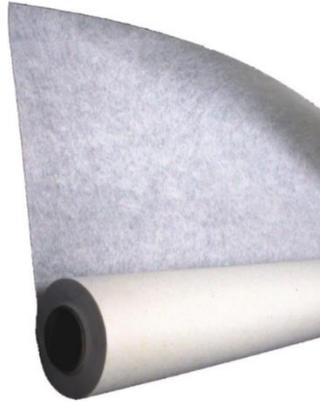


Fuente: <http://chova.com/wp-content/uploads/chovastar-impermabilizante-liquido-elastico.jpg>.

Consulta: septiembre de 2016

²⁶ SANCHEZ, Irais. Op. cit p. 49.

Figura 9. **Tela para refuerzo de poliéster**



Fuente: <http://www.gruposamir.com/wp-content/uploads/2015/07/9237.jpg>. Consulta: septiembre de 2016

2.1.5. Capa drenante

Esta capa se encuentra por encima de la membrana anti-raíz impermeabilizante y por debajo de la capa filtrante. Tiene como función recibir el agua producto de precipitaciones, así como el agua excedente de toda la superficie vegetal, además de que sirve para almacenar bajas cantidades de agua.

Esta capa debe tener la capacidad de desalojar un mínimo de dos litros de agua por minuto por cada metro cuadrado, dicha capa está ligada con el tipo de vegetación a instalar.

Un factor importante a considerar es la pendiente del techo, al contar con una pendiente menor al 5 %, será necesario colocar un drenaje especial para lograr el correcto desalojo del agua, y en el caso contrario de una pendiente mayor al 40% se deberá tener cuidado con el sustrato para evitar su deslizamiento.

La capa drenante puede ser conformada por uno o algunos de los siguientes materiales:

- Láminas de fibra sintética
- Mallas plásticas
- Placas drenantes de polietileno
- Placas drenantes de poliestireno²⁷

En el mercado aun no se encuentran todas las opciones dedicadas a las aplicaciones de techos verdes pero existen soluciones prácticas que en este estudio tomaremos una capa drenante exterior de drenaje nodular de polietileno de alta densidad.

Figura 10. **Drenaje nodular de polietileno de alta densidad.**



Fuente:

[http://www.guatemala.generadordeprecios.info/imagenes3/onduline_fonad_2_200_125_635032 DC.jpg](http://www.guatemala.generadordeprecios.info/imagenes3/onduline_fonad_2_200_125_635032_DC.jpg). Consulta: septiembre de 2016

²⁷ SANCHEZ, Irais. *Ibíd.* p. 53.

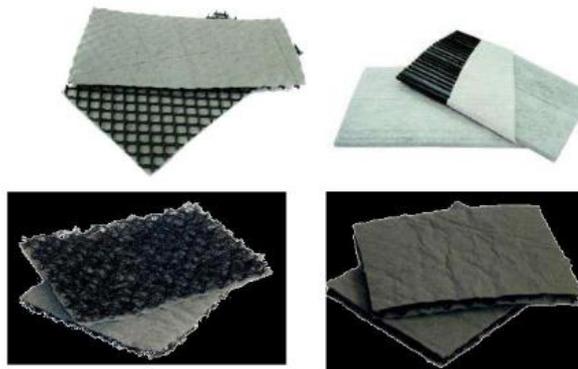
2.1.6. Capa filtrante

La capa filtrante es colocada por encima de la capa drenante, de esta manera ayuda a separarla del sustrato, dicha capa tiene como función principal el retener partículas pequeñas de material inorgánico y orgánico, de esta manera el agua puede fluir libremente hacia la capa drenante y así tener un funcionamiento adecuado

“Esta capa debe cumplir con un peso mínimo de 200 gramos por metro cuadrado, y permitir el paso de dos litros de agua por minuto por cada metro cuadrado.”²⁸

Mayorga, en su trabajo de tesis *Geosintéticos en Guatemala* (Arquitectura paisajista, techos verdes y estabilización de suelos), cataloga esta capa filtrante como geoespaciador, en donde recomienda un geotextil de la familia de Macdrain.

Figura 11. Geosintético, Familia de Macdrain



Fuente: MAYORGA, Andrea. *Aplicación arquitectónica de los geosintéticos en Guatemala* (arquitectura paisajista, techos verdes y estabilización de suelos). p. 102.

²⁸ SANCHEZ, Irais. *Ibíd.* p. 55.

2.1.7. Capa de sustrato

La capa de sustrato es la penúltima del sistema de techo verde, la cual está diseñada para soportar la vegetación, siendo esta capa directamente proporcional al tipo de vegetación a instalar, teniendo como factores las condiciones micro climáticas, como la topografía, temperatura, humedad, luz y cobertura vegetal, evapotranspiración.

Esta capa cuenta con el requerimiento, que sin importar el tipo de vegetación a instalar, el sustrato debe tener como mínimo 10 cm de espesor.

“Esta capa ayuda a la retención de agua y aportación de nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas, siendo esto de vital importancia para el crecimiento y conservación de la vegetación.”²⁹

En el diseño de un techo verde, una consideración especial se debe prestar a la fórmula de la capa de sustrato, ya que jugará un papel importante en el éxito o el fracaso de la vegetación. La capa de sustrato es típicamente una combinación de materia inorgánica, materia orgánica, aire y agua.

Los ejemplos de la materia inorgánica: arena, grava o agregado liviano. Ejemplos de materia orgánica: compost, humus de lombriz, etc. Algunas de las características de la capa de sustrato son (en mayor o menor grado, depende de los requisitos de la capa vegetativa):

- Un buen drenaje y aireación
- capacidad de retención de agua
- Durabilidad

²⁹ SANCHEZ, Irais. *Ibíd.* p. 55.

- la capacidad de los ciclos de nutrientes
- Peso - seco / saturado
- Filtración

La capa de sustrato debe ser formulada específicamente para satisfacer los requisitos de la vegetación a la que está destinando, así como su composición para el diseño estructural, pendiente, drenaje y condiciones climáticas

La capa de sustrato ancla la vegetación, dándole nutrientes para el crecimiento y el sustento. A diferencia de los suelo a nivel de tierra, la capa de sustrato en el techo verde, necesita ser diseñado para cumplir funciones específicas de drenaje y peso.

La capa de sustrato se desarrolla específicamente para una determinada aplicación y varía en función de la condición del techo. Cuando se considera altamente especializado, puede ser necesario consultar a un especialista en suelos.

Los techos verdes suelen requerir una capa de sustrato con varias características. Estas características se deben equilibrar cuidadosamente para proporcionar sistemas de apoyo saludables para el éxito de la planta.

La capa de sustrato debe:

- Retener cantidades necesarias de aire y el agua para las raíces de plantas.
- Permitir que el agua penetre a través de los medios de siembra.
- Proporcionar estabilidad y el apoyo de la raíz de plantas.
- Resistir la compactación y mantener la integridad.

- Escurrir lo suficientemente bien como para que las raíces no se saturen o se saturen de forma coherente.
- Ser capaz de resistir y permanecer en el lugar durante las ráfagas de viento.

Algunos ejemplos de composición de una capa de sustrato para techos verdes en áreas áridas y semiáridas incluyen 85-95% de esquisto expandido y 5-15% de materia orgánica.

Otras relaciones también se considerar para una capa de sustrato son:

Para aplicaciones más profundas (techos intensivos):

Tosca, agregados ligeros	30 a 60 %
Arena o agregado fino	25-45 %
La materia orgánica	5-15 %
Contenido de aire en la capacidad máxima de agua	15 % a 45 % de H ₂ O

Para aplicaciones menos profundas (techos extensivos):

Tosca, agregados ligeros	50 a 90 %
Arena o agregado fino	0-35 %
La materia orgánica	0-20 %
Contenido de aire en la capacidad máxima de agua	10 % a 35 % de H ₂ O.

2.1.8. Capa de vegetación

Por último se encuentra la capa de vegetación, en la cual se van a alojar las plantas determinadas a instalar. Para elegir correctamente la vegetación se deben considerar los siguientes criterios:

- **Inclinación del techo:** este aspecto ayuda a la determinación del sistema de desagüe, así como la capa de sustrato.
- **Exposición al viento:** se debe de considerar al momento de escoger la vegetación a instalar, la cual debe de resistir los vientos de la localidad.
- **Espesor del sustrato:** dependerá del tipo de vegetación a instalar.
- **Orientación al cielo:** esto definirá la cantidad de evapotranspiración que realice la vegetación instalada en el techo verde.
- **Períodos de sequía:** la vegetación debe de tener una buena capacidad de retención de agua para evitar su deterioro.
- **Gastos de mantenimiento:** este aspecto es fundamental, el instalar una azotea verde no es sólo la instalación sino que debe de realizarse un mantenimiento programado, para que se conserve de manera correcta y pueda brindar todos los beneficios correspondientes.
- **Aspecto visual:** este es directamente proporcional al mantenimiento, al dar un mantenimiento correcto se tendrá un agradable aspecto visual, pero a falta de mantenimiento tendrá un aspecto deplorable.³⁰

2.2. Otros componentes de un techo verde

Los componentes básicos de un techo verde se describieron anteriormente, pero existen otros elementos o componentes que se deben tomar en cuenta a la hora de plantear la instalación de un techo verde.

³⁰ SANCHEZ, Irais. Op. cit. p. 59.

2.2.1. Sistemas de irrigación

Los sistemas de riego o irrigación ofrecen una serie de ventajas que posibilitan racionalizar el agua disponible. Cualquier sistema de riego debe someterse a un estudio previo para determinar si es el más idóneo, tomando en consideración desde el tipo de vegetación, hasta la forma de distribuir el agua para obtener el mejor rendimiento.

Los tipos de sistemas de irrigación se encuentra clasificados por:

Riegos por aspersión. Este método, de uso general, se aplica sobre grandes superficies lanzando un gran volumen de agua controlada y uniforme en forma de lluvia. Por lo general, actúa cubriendo toda el área y es muy adecuado para automatizar la operación. De entrada, deben distinguirse dos tipos de riego:

Riego con aspersores. El reparto de agua se efectúa de acuerdo con una pluviometría prefijada, y es un sistema idóneo para superficies geoméricamente regulares y de una amplitud considerable. Los principales tipos de aspersores son: aspersor de impacto y aspersor de turbina. Respecto del área que los aspersores humedecen se pueden catalogar en: circulares y sectoriales. Por último, los aspersores se catalogan según sus posiciones de instalación: aéreos, los que se sitúan sobre la superficie del suelo, y emergentes: los que se instalan enterrados y protegidos por una carcasa.

Riego con difusores. Distribuye el agua en forma de pequeñas gotas. La difusión del agua se realiza a través del aire, siendo nula la participación del suelo en estos riegos. El difusor más utilizado es el emergente, que reparte el agua en zonas ajardinadas, plantaciones de césped o arbustos pequeños.

Riego por goteo. El agua se distribuye puntualmente, sin atomización y sin que empape el terreno. La densidad de puntos de riego humedece ciertas zonas, mientras la mayor parte del terreno permanece seco. Este tipo de riego es aplicable tanto para zonas tan limitadas como la plantación de arbolado, borduras de arbustos, jardineras, o bien para plantaciones extensas, ya que sólo humedece las zonas deseadas. Este sistema puede complementar al riego por aspersión generalizado en zonas concretas o mantener áreas de arbustos y arbolado de alineación de forma autónoma.

En comparación a otros sistemas de riego destaca su importante ahorro en agua, superior siempre al 50 % del consumo. Asimismo, tiene otras grandes ventajas en lo relacionado con las pendientes del terreno, ya que por accidentadas que sean, no son un obstáculo; no produce cortezas en la superficie del terreno; se pueden utilizar aguas de calidad más baja y permite la aplicación simultánea abonos líquidos.

Riego exudante. Es una variación del riego por goteo y se conoce también como tubería exudante. Consiste en una serie de canalizaciones plásticas, porosas, que permiten que el agua que circula pase al suelo. De esta manera se consigue un riego uniforme y constante en toda su longitud, ya que el agua se transmite por la propia capilaridad del terreno, alcanzando más o menos superficie en función de la estructura de los substratos. Los ahorros de agua se cifran entre un 35 y un 45 %.

Sistemas informatizados. El mantenimiento de los espacios verdes está directamente relacionado con la disponibilidad de agua. Por ello, es muy importante racionalizar su uso optimizándolo al máximo y evitando los despilfarros, que se manifiestan en pérdidas innecesarias, tiempos inadecuados, frecuencias sin controlar, etc.

Los sistemas de irrigación para un techo verde son importantes para el mantenimiento del mismo ya que por ser un elemento vivo no puede quedar sin un sistema que permita la hidratación en temporadas de sequía, aun cuando se haya considerado la cubierta vegetal adecuada al área y temporadas locales en donde se instalará.

Estos sistemas de irrigación pueden ser forma manual hasta un sistema automatizado de irrigación, eso ya dependerá de la extensión y la disponibilidad de inversión inicial.

2.2.2. Tipos de inclinación del techo

Como bien se sabe no todas las edificaciones cuentan con una superficie en sus techos completamente plana o con 0 % de inclinación, esta inclinación puede variar según la construcción y diseño de cada techo. En Guatemala AGIES NSE 4-10 “Requisitos prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles” recomienda la pendiente o inclinación de una edificación, respecto de su material de construcción del techo.

Tabla II. Pendientes mínimas por tipo de cubierta

Tipo de cubierta	Pendiente mínima
Teja de barro cocido	42 %
Fibro-cemento	27 %
Plástica	20 %
Metálica	15 %
Losa de concreto	2 %

Fuente: Asociación guatemalteca de ingeniería estructural y sísmica. *NSE 4-10 Requisitos prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles.* p. 61.

“Tomando en cuenta la tabla anterior y que el porcentaje de inclinación es decisivo para la instalación de techos verdes ya que la inclinación de un techo verde debe ser idealmente de 5 %.”³¹

A continuación se presenta una tabla de conversión de grados de inclinación a porcentaje de inclinación:

Tabla III. **Tabla de conversión del porcentaje de inclinación a Grados y de Grados a porcentaje de inclinación**

% de inclinación	Grados	Grados	% de inclinación
5	2.9	3	5.2
10	5.7	5	8.8
15	8.5	10	17.6
20	11.3	15	26.8
30	16.7	20	36.4
40	21.8	25	46.6
50	26.6	30	57.7
60	31.0	35	70
80	38.7	40	83.9
100	45	45	100

Fuente: MINKE, Gernot. *Techos verdes: planificación, ejecución, consejos prácticos.* p. 25.

³¹ MINKE, Gernot. Op. cit. p. 25.

“Los techos verdes se clasifican según su inclinación y el tipo de vegetación.”³². Los cuales se dividen en techos verdes horizontales, de poca inclinación, de fuerte inclinación y techos empinados.

2.2.2.1. Techos verdes horizontales

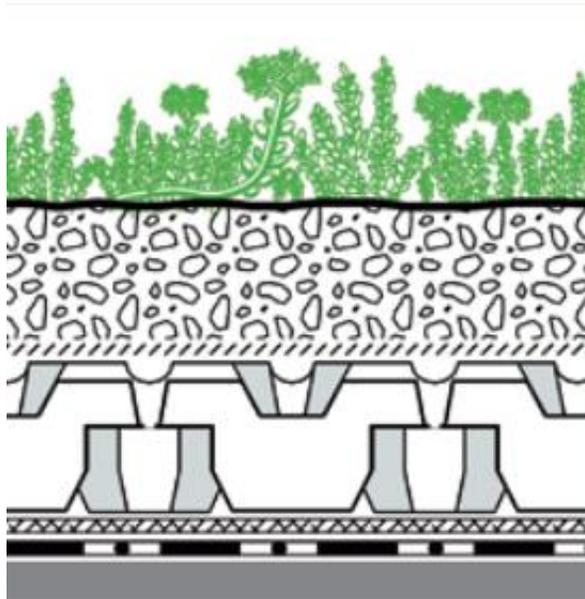
“Estos techos son aquellos que tiene una pendiente menor o igual a 5%”³³ Considerando la teoría de Minke que un techo verde no puede tener una inclinación menor al 5% por especificaciones técnicas de saturación y desagüe, Por especificaciones técnicas de construcción (ver punto 2.1.1 Soporte estructural o capa base), los techos o las estructuras portantes no deben tener una pendiente menor a 2 %, dejaremos la observación que pueden haber techos de menor porcentaje a 5 % pero no es recomendable su instalación.

De ser necesario instalar un techo verde en un techo con una inclinación menor a 2 %, se debe considerar que la capa drenante del mismo debe ser más profunda en un extremo y menos profundo en el otro, para tener un porcentaje de inclinación y así permitir que la saturación del agua pueda drenar correctamente para no comprometer la estructura portante así como la capa de sustrato al saturarse de agua.

³² ELY, Oscar. *Terrazas verdes, sostenibilidad para todos*. <http://www.trcimplan.gob.mx>. Consultado: agosto de 2016

³³ ELY, Oscar. *Terrazas verdes, Sostenibilidad para todos*. <http://www.trcimplan.gob.mx>. Consultado: agosto de 2016

Figura 12. **Sección de un techo verde horizontal**

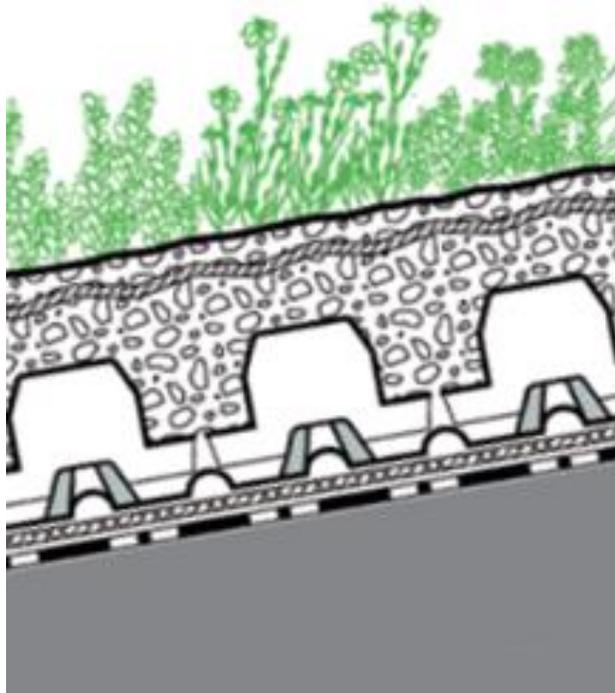


Fuente: ZINCO. *Sistemas ZinCo para cubiertas verdes*. <http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es>. p. 13.

2.2.2.2. Techos verdes de poca inclinación

Estos techos son aquellos que tienen una pendiente mayor que 5% y menor a 36%. Este tipo de techos pueden ser de tipo intensivo o extensivo, ya que la poca inclinación no compromete la estabilidad de la capa de sustrato y permite una estabilidad a la capa de vegetación.

Figura 13. **Sección de un techo verde de poca inclinación**



Fuente: ZINCO. *Sistemas ZinCo para cubiertas verdes*. <http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es>. p. 15.

2.2.2.3. Techos verdes de fuerte inclinación

“Estos techos son aquellos que tiene una pendiente mayor a 36 % y menor a 84 %. Para techos mayores a una pendiente mayor a 40 %, deben tener consideraciones especiales en su instalación”³⁴

³⁴ MINKE, Gernot. Op. cit. p. 54.

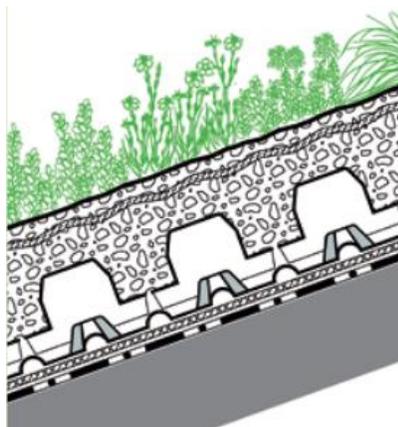
Para este tipo de techos verde se considerara únicamente los intensivos ya que por la inclinación del techo y teniendo una capa de sustrato delgada (como los utilizados en los tipo extensivos) compromete la integridad de la capa por la erosión y la retención o saturación de agua.

Se debe considerar que las fuerzas de empuje en este tipo de techos aumentan considerablemente en comparación de los techos verdes de leve inclinación que tienen que ser transferidas a la estructura portante por medio de bordes perimetrales o barreras de retención.

La capa de sustrato tiene que ser protegida contra la erosión. La selección de plantas y los métodos de plantación deben ajustarse a la pendiente. Es imprescindible la instalación profesional de una impermeabilización anti-raíces así como una manta de protección con gran capacidad de retención de agua.

Es fundamental tener en cuenta el cuidado y mantenimiento de la cubierta verde desde la planificación inicial del proyecto.

Figura 14. **Sección de un techo verde de fuerte inclinación**



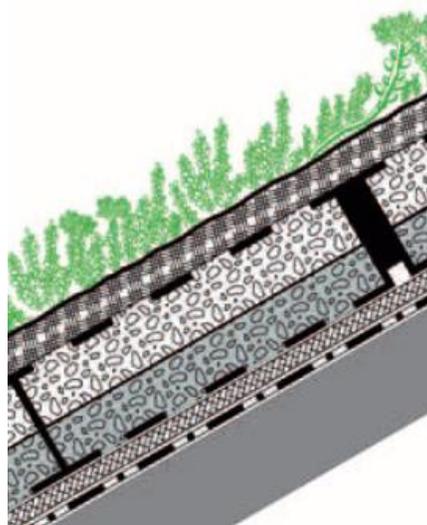
Fuente: ZINCO. *Sistemas ZinCo para cubiertas verdes*. <http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es>. p. 17.

2.2.2.4. Techos verdes empinados

Estos techos son aquellos que tienen una pendiente mayor a 84 %, en este tipo de techos es exclusiva para los techos de tipo extensivo. La selección de plantas tiene que estar bien adaptada a las condiciones extremas de una cubierta vegetal inclinada, ya que la radiación solar es mayor (especialmente en cubiertas orientadas al sur) y la velocidad de escorrentía del agua es mayor que en una cubierta plana.

El riego debe planificarse, aunque solo sea necesario en tiempos de sequía. Se evitarán las zonas sin cobertura vegetal para prevenir problemas de erosión. Además, la instalación profesional de una impermeabilización antiraíces es una condición previa indispensable. Es también necesario transferir las fuerzas de empuje a petos estables y a barreras de retención adicionales.

Figura 15. **Sección de un techo verde empinado**



Fuente: ZINCO. *Sistemas ZinCo para cubiertas verdes*. <http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es>. p. 19.

2.2.3. Sistemas de seguridad

Cualquier trabajo sobre un techo implica riesgos de trabajos en altura, ya se trate de trabajo de inspección como de mantenimiento, la prevención de accidentes puede salvar vidas.

Se pueden aplicar sistemas de seguridad de anticaídas que no perforan la impermeabilización, como dispositivos de fijación los cuales crean puntos de anclaje y los cuales se pueden adaptar a cualquier tipo de equipo de protección personal para el trabajo en alturas.

Figura 16. Punto de anclaje por elemento preenchufados



Fuente: <http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es/images/content/proteccion/sr.jpg>. Consultado: agosto de 2016

Figura 17. **Punto de anclaje móvil en carril**



Fuente: http://img.archiexpo.es/images_ae/photo-g/66390-8953847.jpgg/66390-8953847.jpg.

Consultado: agosto de 2016

3. UBICACIÓN PARA LOS PROTOTIPOS DE TECHO VERDE

3.1. Aspectos técnicos

Para el diseño de prototipos de techo verde se tomarán los datos técnicos desarrollados en el trabajo de la Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Escuela de Mecánica Industrial de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería llamado *Prototipos de Techo Verde*. Donde se plantean los aspectos técnicos sobre el diseño de un prototipo que permita la medición de variables ambientales que permitan una eficiencia energética así como los beneficios económicos y ambientales en la implementación de un techo verde.

3.1.1. Ubicación

Se eligieron tres ubicaciones distintas las cuales por su ubicación geográfica, como su ubicación estratégica permitirán realizar la implementación de los prototipos de techos verdes, se podrán simular 3 distintos micro-climas dentro de un área considerablemente pequeña y con un riesgo mínimo a algún daño a los mismos. Las ubicaciones que se eligieron para la implementación de los prototipos de techo verde son:

- Jardín Botánico-Herbario USCG-Index Seminum del Centro de Estudios Conservacionistas: ubicado en la avenida La Reforma, 0-63, zona 10 de la ciudad de Guatemala, Guatemala. Esta localidad cuenta con una alta vegetación y con 17,611 metros cuadrados de extensión, en el cual se puede simular el clima de toda el área industrial en la parte de salida a carretera al salvador.

- Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur (ITUGS): ubicado en el Km 45 antigua carretera Palín-Escuintla, Palín, Escuintla, esta localidad presenta condiciones climáticas normales para el área tropical sur del país, donde se concentran varios complejos industriales.
- Terraza Edificio T-3, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala: ubicada en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que por su ubicación se encuentra en el área industrial de la ciudad de Guatemala.

3.1.2. Latitud, longitud y altitud sobre el nivel del mar

La altitud de la ciudad de Guatemala se encuentra en un promedio de 1,592 metros sobre el nivel del mar (<http://cnaturales.cubaeduca.cu/medias/pdf/1517.pdf>) las localidades elegidas se encuentran a una altura cercana a esta altura.

- Jardín Botánico-Herbario USCG-Index Seminum del Centro de Estudios Conservacionistas: con las siguientes coordenadas: latitud 14.61452 longitud: -90.51304, a una altura de 1,508 metros sobre el nivel del mar.
- Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur (ITUGS): con las siguientes coordenadas: latitud 14.37453 longitud: -90.72328, a una altura de 865 metros sobre el nivel del mar.
- Terraza Edificio T-3, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala: con las siguientes coordenadas: latitud 14.58761 longitud: -90.55316, a una altura de 1491 metros sobre el nivel del mar.

3.1.3. Clima

Las ubicaciones del Jardín Botánico-Herbario USCG-Index Seminum del Centro de Estudios Conservacionistas y Terraza Edificio T-3, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala se tomarán como la misma área, ya que se encuentran dentro del área metropolitana con un clima subtropical de tierras altas, debido a su elevación sobre el nivel del mar.

El clima en ciudad de Guatemala es generalmente muy suave, casi primaveral a lo largo del año. La temporada de lluvias se extiende de mayo a noviembre, mientras que la estación seca abarca el resto del año.

En ciudad de Guatemala también tiende a soplar mucho el viento, lo que puede reducir la sensación térmica. La ciudad de Guatemala es la capital más fría y más alta de toda Centroamérica. Su temperatura media anual es de 20 °C.

El verano va de junio a septiembre, con temperaturas que oscilan entre 16 y 28 °C, generalmente presentan mañanas soleadas y tardes de lluvia o tormentas eléctricas, la sensación térmica en esta estación puede ser un poco más elevada en el periodo de canícula o recesión de las lluvias, que generalmente se da entre los meses de julio y agosto, la humedad relativa se mantiene en niveles muy elevados e insalubres.

El promedio del punto de rocío es de 16 °C. El otoño como en la mayor parte de los países tropicales es poco perceptible, en ciudad de Guatemala va de finales de septiembre a finales de diciembre y se caracteriza principalmente por el incremento de lluvias al inicio de la estación (septiembre-octubre), por el ingreso de los primeros frentes fríos procedentes del norte, la disminución de temperaturas y el incremento de la velocidad del viento. El invierno va de

diciembre a marzo, con temperaturas que oscilan entre los 13 y 24 °C, raras veces más alta, la velocidad del viento puede hacer sentir entre 4 a 5 grados menos. La primavera es la estación más calurosa y seca de todo el año que va de finales del mes de marzo a finales de mayo, donde la temperatura puede llegar hasta a los 34 grados Celsius, en algunas ocasiones.

Cabe mencionar que el clima se ve influenciado también por ciclones tropicales que afectan a esta región desde finales de la primavera hasta mediados del otoño (entre los meses de mayo y noviembre) que se caracteriza por días con lluvia intermitente. (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología - INSIVUMEH)

Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur (ITUGS) ubicado en Palín Escuintla, comparte con el municipio de Amatitlán un clima cálido seco, ya que se sitúan en un pequeño valle, el cual finaliza en el cañón de Palín. El soleamiento es intenso, por la ausencia de árboles de gran tamaño aunado al hecho de que la humedad relativa es baja.

“Se distinguen únicamente dos estaciones durante el año, la seca y la húmeda. La estación seca comienza en noviembre y finaliza en mayo, en cambio la estación húmeda comienza en Junio y finaliza en Noviembre. La temperatura promedio ronda los 23 grados centígrados.”³⁵

3.1.4. Temperatura

La temperatura para el área de la Ciudad de Guatemala se encuentra en un promedio de 25.5°C (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología,

³⁵ ROSALES, Mario. *Centro de trabajos para ciegos, Palín, Escuintla*. p. 34.

Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH) y para la ciudad de Palín, Escuintla, 21.4°C.

Tabla IV. **Temperatura promedio en la ciudad de Guatemala (1999-2011)**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp. máx. media (°C)	30	32,1	32	33,9	33,9	31,2	29,1	30,2	29,8	28,6	29,9	28,8	33,9
Temp. media (°C)	24,3	25,8	26,8	27,8	27,1	25,8	25,4	25,5	25,1	24,7	24,2	23,9	25,5
Temp. mín. media (°C)	17,9	19	19,8	20,9	21	20,3	20,3	20,4	19,7	19,6	18,6	18,2	19,6

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH.

Tabla V. **Temperatura promedio en la ciudad de Palín, Escuintla (1999-2011)**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp. máx. media (°C)	26,4	27	28,1	28	27,5	26,1	26,4	26,5	25,8	25,8	25,9	25,9	26,6
Temp. media (°C)	20,7	21	22	22,4	22,3	21,7	21,7	21,7	21,3	21,1	20,8	20,5	21,4
Temp. mín. media (°C)	15	15,1	15,9	16,8	17,2	17,4	17,1	17	16,9	16,5	15,8	15,1	16,3

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH.

3.1.5. Humedad

Cuando se habla de humedad es la cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo o en el aire. Para la humedad en el ambiente se le denomina humedad relativa que es relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener.

Para la ciudad de Guatemala la humedad relativa promedio anual es de 77.77 % mientras que para la ciudad de Palín, Escuintla es de 74.95 % de promedio anual (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH)

Tabla VI. **Humedad relativa promedio en la ciudad de Guatemala (1999-2011)**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Humedad Relativa media	74.32	73.45	73.23	74.33	77.36	82.41	80.82	80.95	84.50	82.00	79.27	76.05	77,77%

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH.

Tabla VII. **Humedad relativa promedio en la ciudad de Palín, Escuintla (1999-2011)**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Humedad Relativa media	89.4	74	75.1	75	74.5	73.1	73.4	73.5	72.8	72.8	72.9	72.9	74.95%

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH.

3.1.6. Precipitación

Es cualquier forma de hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre. La precipitación pluvial se mide en mm, que sería el espesor de la lámina de agua que se formaría, a causa de la precipitación, sobre una superficie plana e impermeable y que equivale a litros de agua por metro cuadrado de terreno (l/m^2).

Tabla VIII. **Precipitación promedio en la ciudad de Guatemala (1999-2011)**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación Total (mm)	2.8	5.4	6	31	128.9	271.8	202.6	202.7	236.6	131.6	48.8	6.6	106,23

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH.

Tabla IX. **Precipitación promedio en la Palín, Escuintla (1999-2011)**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación Total (mm)	2	5	10	40	159	327	249	247	329	196	32	7	133,58

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH

3.1.7. Vientos

Los vientos se miden según su fuerza y la dirección desde la que soplan, se tomarán en cuenta la velocidad del viento (fuerza) más no su dirección ya que los prototipos no contaran con una dirección definida.

Para la ciudad de Guatemala la velocidad del viento promedio anual es de 19.83 Km/h y para la ciudad de Palín, Escuintla es de 24 km/h.

Tabla X. **Velocidad del viento en la ciudad de Guatemala (1999-2011)**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Velocidad del viento (km/h)	18	15	12	9	14	19	22	19	32	29	27	22	19,83

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH.

Tabla XI. **Velocidad del viento en la ciudad de Palín, Escuintla (1999-2011)**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Velocidad del viento (km/h)	23	20	17	14	19	24	27	24	37	34	32	27	24,32

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH.

3.1.8. Presión atmosférica

Presión que ejerce la atmósfera sobre la superficie de la Tierra. La medición para la presión atmosférica está en pascales (PA) y su magnitud en hectopascales (hPA) que equivale a 100 pascales.

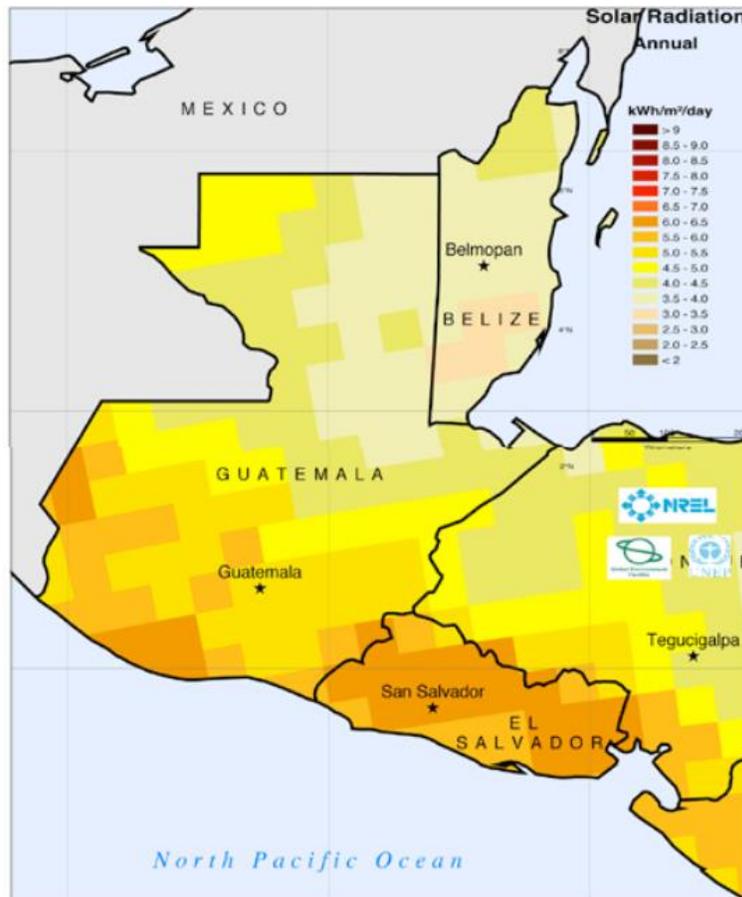
Para la ciudad de Guatemala es de 848hPA y para la ciudad de Palín, Escuintla es de 830 hPA.

3.1.9. Incidencia solar

“En Guatemala los estudios de radiación solar para proyectos de energías alternativas, energía solar han realizado estudios donde según los mapas solares de la Evaluación de Recursos de Energía Solar y Eólica (SWERA), la irradiación promedio de Guatemala es de 5.3 kWh/m²/día.”³⁶

³⁶ Koberle, Alex. *Energizar a Guatemala: propuesta de plan de electricidad sostenible*. p. 65.

Figura 18. Irradiación solar en Guatemala (2010)



Fuente: Koberle, Alex. Energizar a Guatemala: propuesta de plan de electricidad sostenible.

p. 65.

4. PROTOTIPO TECHO VERDE

Para el diseño de prototipo de techo verde, se consideran las siguientes especificaciones:

- Debe soportar el peso del techo verde que se instalara en él.
- Debe simular una construcción de una estructura formal para poder realizar mediciones correctamente.
- La construcción del prototipo será una construcción de primera categoría.

4.1.1. Elementos

Los elementos con que debe contar el prototipo serán su estructura portante, accesorios y el techo verde.

4.1.1.1. Estructura portante

La estructura portante simulará una estructura con construcción de primera categoría, el cual se utilizarán paredes de concreto prefabricado, con una base de madera rellena de cemento para su estabilización, el techo será fundido con las especificaciones estructurales de RG-1 “plan Regulador, Reglamento de Construcción de la Ciudad de Guatemala”, AGIES NSE 2-10 “demandas estructurales, Condiciones de sitio y niveles de protección”, AGIES NSE 4-10 “Requisitos Prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles”, NRD1 “Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la república de Guatemala”, NRD3 “Especificaciones técnicas para materiales de construcción” y “Manual de especificaciones técnicas construcción de vivienda y urbanizaciones fondo para la vivienda FOPAVI”.

La carga que debe soportar la estructura dependerá del tipo de techo verde que se instalará, a continuación se presentan la carga aproximada por metro cuadrado de cada tipo de techo verde a instalar, los valores están indicados en estado de saturación:

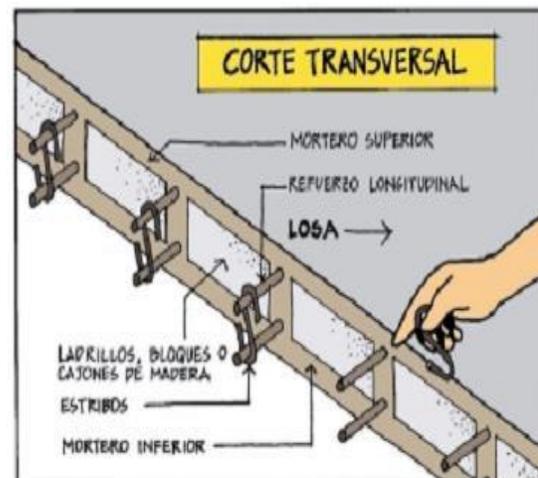
Tabla XII. **Cargas por tipo de techo verde en estado saturado**

Tipo de techo a instalar	Carga en estado saturado
Techo verde extensivo	110 kg/m ² – 140 kg/m ²
Techo verde semi-intensivo	150 kg/m ² – 250 kg/m ²
Techo verde intensivo	250 kg/m ²

Fuente: SÁNCHEZ, Irais. *Manual para el diseño e instalación de una azotea verde.* p.36.

Se debe considerar que estos datos son teóricos y se debe considerar que, en determinado momento, pueden variar dependiendo de la instalación por realizar. Hay que tener en cuenta que la sección transversal de los techos puede variar de una construcción a otra, pero todas deben cumplir con las especificaciones y reglamentaciones de construcción de la ciudad de Guatemala.

Figura 19. **Ejemplo de sección transversal de una losa**



Fuente: http://www.arkigrafico.com/wp-content/uploads/2013/09/4728722842_6d1e1bec1a.jpg

Consulta: septiembre de 2016

El costo para esta primer capa dependerá del estado en que se encuentre un techo para poder realizar la instalación, si un techo esta descuidado o ya está al final de su vida útil, el acondicionamiento del mismo puede elevar el costo de la instalación considerablemente, en el caso de estructuras ya construidas.

Para el prototipo de techo verde por proponer la estructura portante con respecto a los tamaños de las planchas de pre-fabricado se puede considerar el siguiente diseño:

- Para la estructura portante se consideraron los siguientes elementos:
 - Placas de teknomuro gris (12 cm de profundidad 20cm de alto 84cm de ancho).
 - Postes H (2.00 mts. de altura, 12 cm de ancho y 12 cm de profundidad).
 - Postes H (1,80 mts. de altura, 12 cm de ancho y 12 cm de profundidad).
 - Postes H (2,20 mts. de altura, 12 cm de ancho y 12 cm de profundidad).
 - Postes esquineros (1,80 mts. de altura, 12 cm de ancho y 12 cm de profundidad).
 - Postes esquineros (2,20 mts. de altura, 12 cm de ancho y 12 cm de profundidad).
 - Vigueta para soporte de bovedilla para losa (10 cm de altura, 15 cm de ancho y 2,22 mts. de largo).
 - Bovedilla para losa (0.10 cm de altura x 0.20 cm de ancho x 0,52 cm de largo).

- Para la base de madera se considera tablas de madera de pino tratada para exteriores con dimensiones de 20 cm de alto, 218 cm de ancho y 2,54 cm de profundidad (1 pulgada).
- La inclinación del techo será de 10°, está dada por la profundidad del diseño (218 cm) y la altura de la placa de teknomuro (20 cm).

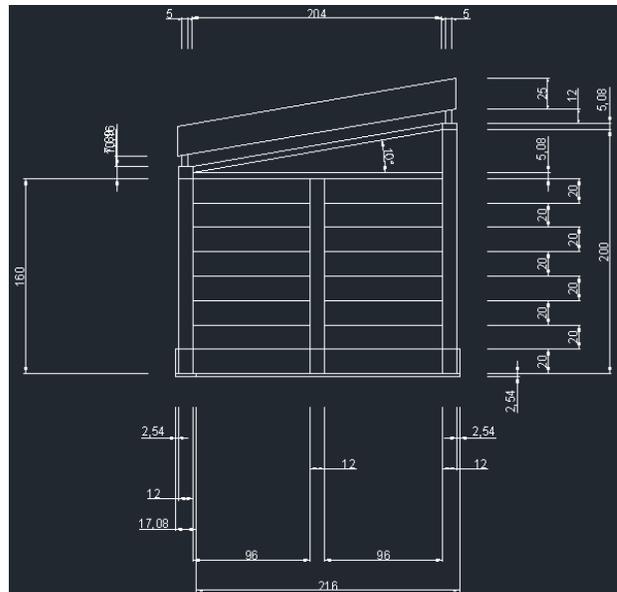
El diseño del armado del techo se considera:

Figura 20. **Diseño de prototipo de techo verde**



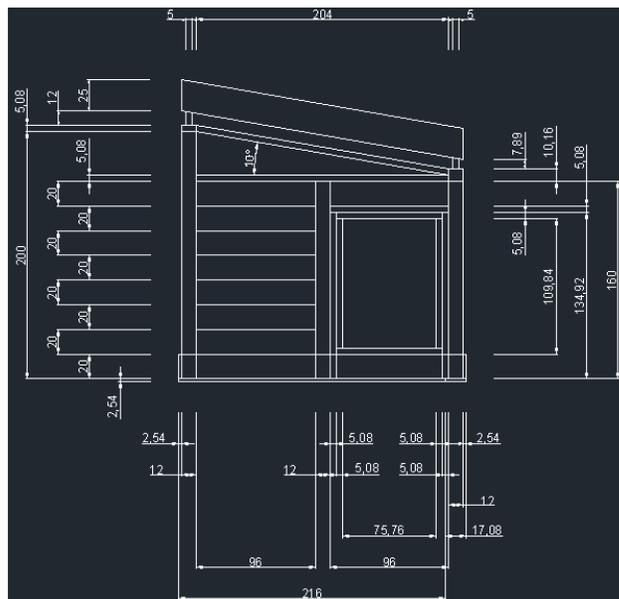
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Elevación derecha de prototipo de techo verde



Fuente: elaboración propia; las medidas están dadas en centímetros.

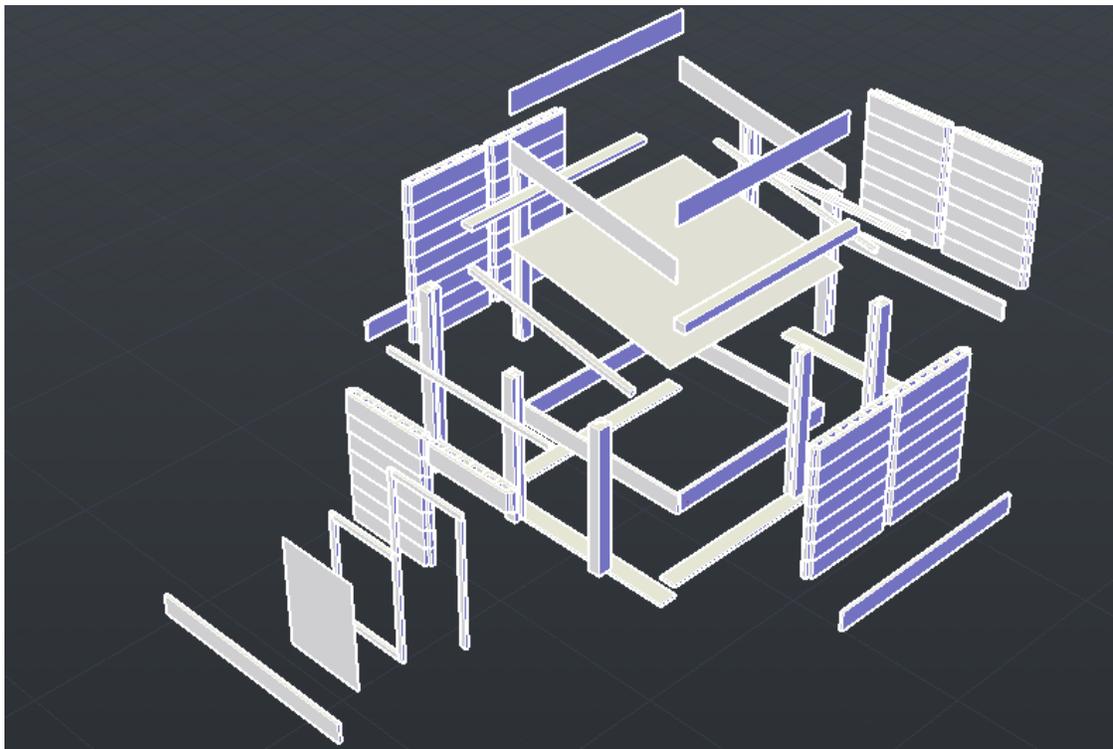
Figura 24. Elevación izquierda de prototipo de techo verde



Fuente: elaboración propia; las medidas están dadas en centímetros.

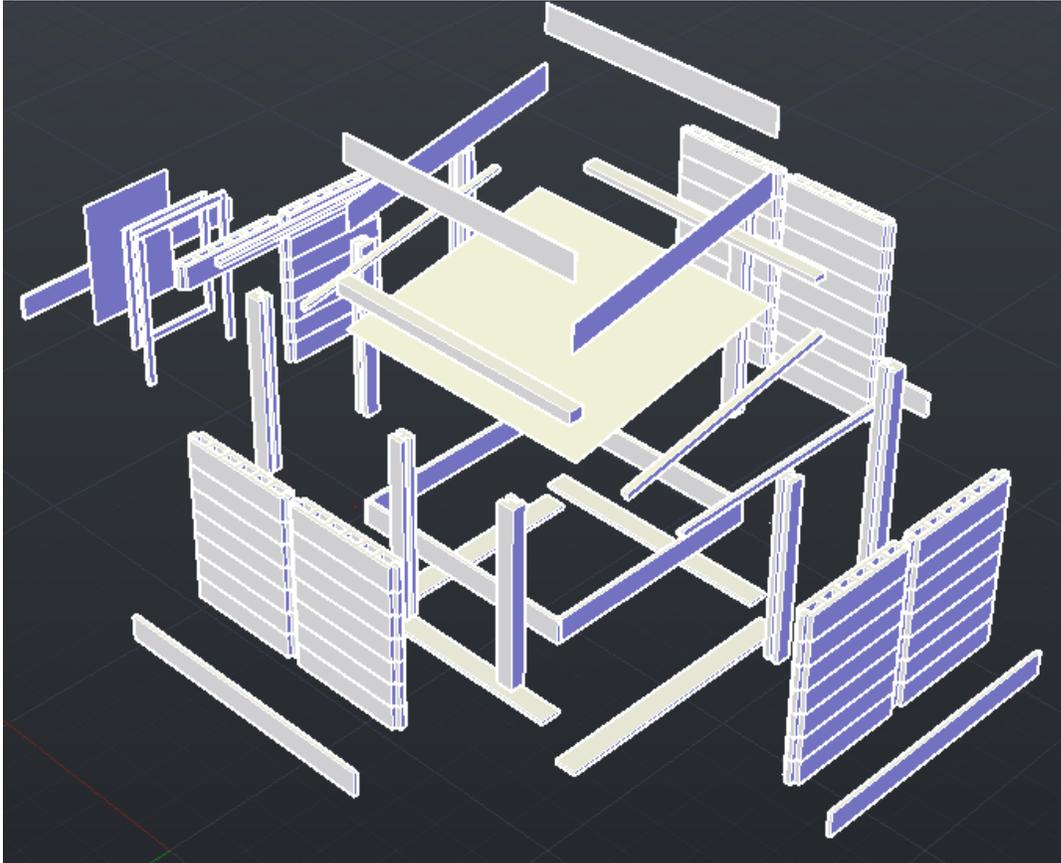
Para la elevación izquierda se aprecia la sección de la puerta que permitirá el ingreso al interior del prototipo del techo verde en el cual se recomienda que se coloque un marco de madera y una puerta de madera la cual puede ser de profundidad de 2,54 cm (1 pulgada), la sección transversal se puede apreciar en el siguiente diagrama:

Figura 25. **Diagrama de explosión de prototipo de techo verde, vista superior izquierda**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Diagrama de explosión de prototipo de techo verde, vista superior derecha**



Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Sistema de desalojo de agua

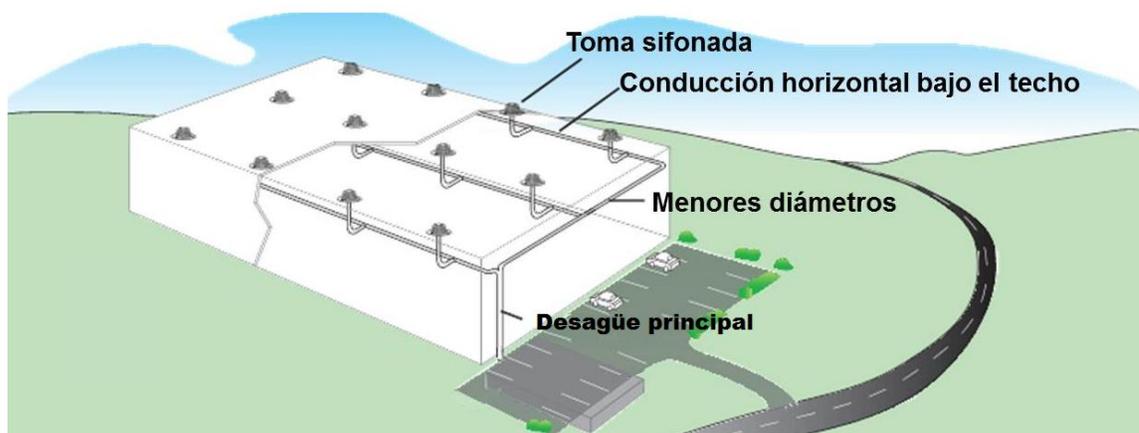
Como en el caso del soporte estructural el sistema de desalojo de agua debe ser un elemento que ya esté instalado en el inmueble o estructura en donde se instalará el techo verde, siempre siguiendo con las especificaciones técnicas que debe cumplir sistema de desagüe, RE-9 “Reglamento específico de construcción de edificaciones en áreas residenciales del municipio de

Guatemala”, AGIES NSE 2-10 “demandas estructurales, Condiciones de sitio y niveles de protección”, AGIES NSE 4-10 “Requisitos Prescriptivos para vivienda y edificaciones menores de uno y dos niveles”, “Manual de especificaciones técnicas construcción de vivienda y urbanizaciones fondo para la vivienda FOPAVI”

Como se describe en la tabla III Porcentaje de retención de agua de lluvia por tipo de techo verde, para el tipo de techo extensivo que se ha seleccionado, la descarga de agua de este tipo de techo es del 50 % al 70 % del agua precipitada sobre el techo verde.

La disposición del sistema de desalojo de agua (drenajes) con el que cuenta la estructura si son internas o externas para poder determinar cómo se drenará el agua del sistema de techo verde.

Figura 27. **Sistema de drenaje dentro de la estructura**



Fuente: <http://hidropluviales.com/sites/default/files/Sifonicos-fabrica.png.jpg>. Consulta: septiembre de 2016.

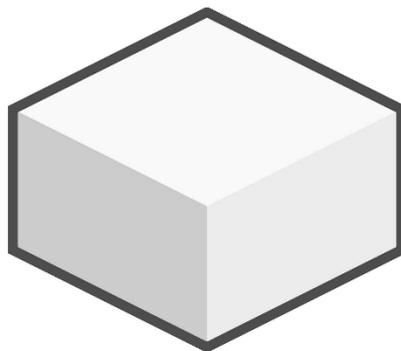
Figura 28. **Sistema de drenaje fuera de la estructura**



Fuente: <http://www.arquitecturadecasas.info/wp-content/uploads/2016/04/canaleta-y-drenaje-de-techo.jpg>. Consulta: septiembre de 2016.

Considerando estos datos se debe tomar en cuenta que si se cuenta con un sistema de drenaje defectuoso, se incurre también en gastos de mantenimiento y reparación para que posteriormente no sea un problema en el mantenimiento del techo verde. Al observar el porcentaje de retención del agua precipitada, no se debe instalar un nuevo sistema de desagüe con mayor capacidad. Lo que sí se debe considerar es colocar rejillas en cada una de las tomas de agua del sistema de desagüe del techo.

Figura 29. **Sección del diseño del techo verde (soporte estructural y sistema de desalojo de agua)**



**Soporte estructural
y Sistema de desalojo de agua**

Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Techo verde

El diseño de la instalación del techo verde (como ya se comentó en el capítulo 2, Elementos de un techo verde), tiene estas capas que lo constituyen (ver figura 4):

- Aislante térmico
- Membrana antiraíz, impermeabilizante
- Capa drenante
- Capa filtrante
- Capa de sustrato
- Capa de vegetación

La definición de cada una de estas están descritas en el Capítulo 2, a continuación se describirá el diseño posible para un techo verde para ser instalado en Guatemala, considerando los diseños que ya se han instalado en otras partes de Latinoamérica con soluciones locales y posibles soluciones alternativas para su instalación.

Para la selección del tipo del techo verde se elegirá un techo extensivo, por la sencillez en la capa de sustrato, ya que esta tendrá un grosor menor a los quince centímetros, esto ayudará a que la carga sobre el techo de la edificación sea menor a la elección de un techo verde intensivo o semi-intensivo.

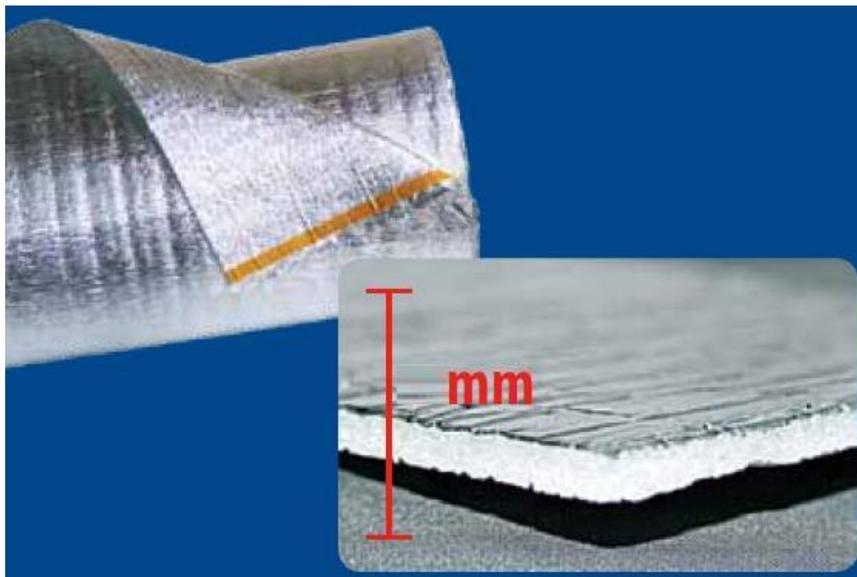
4.1.4. Aislante térmico

El aislante térmico es un elemento muy importante ya que éste aísla toda aquella energía que pueda pasar de capa en capa hacia el techo por medio de conducción como lo hemos visto en el punto 3.4 Radiación Solar. De las

soluciones en el mercado guatemalteco aún no se cuentan con aislantes térmicos dedicados exclusivamente a los techos verdes, pero si existen aislantes térmicos para techos.

Una de las mejores soluciones para esta capa es utilizar un aislante térmico de fabricación de espuma de polietileno laminada en aluminio, estas pueden encontrarse en presentaciones de 3mm, 5mm y 10mm. Se pueden elegir cualquiera de estas y su elección puede determinarse según el monto por invertir o el tipo de techo verde por instalar, para el techo verde que se ha seleccionado, un techo verde extensivo se elegirá una espuma de polietileno de 5mm de grosor.

Figura 30. **Espuma de polietileno laminada en aluminio**

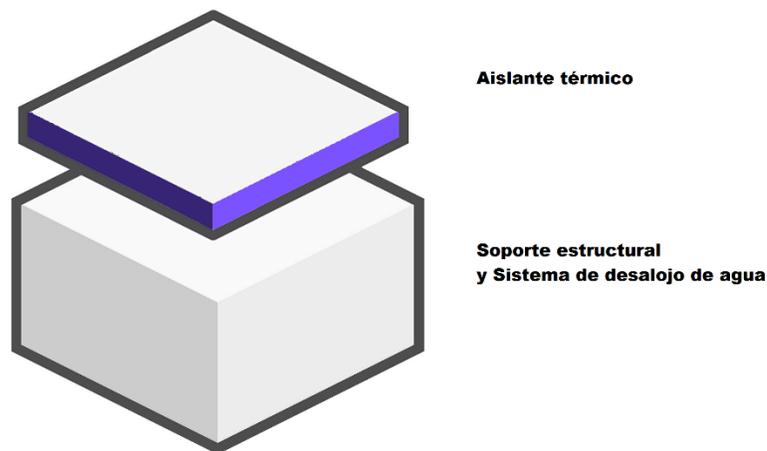


Fuente: http://lamitecmex.com.mx/productos/img_home/prodex%20ad5f-ft.jpg. Consulta: septiembre de 2016.

Para la instalación de este tipo de aislante se debe mantener una superficie limpia y preferiblemente uniforme, aunque por las propiedades del material puede ser instalado en superficies con irregularidades menores. La sujeción del aislante puede ser por medio de medios como clavos o tornillos, de preferencia se sujeta

por medio de una mezcla bituminosa o de base de resina que es la mejor opción para reforzar el aislante con una base impermeable adicional a la siguiente membrana que se instalará.

Figura 31. **Sección del diseño del techo verde (aislante térmico)**



Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Membrana antiraíz, impermeabilizante

Esta capa es la encargada que tanto el agua como las raíces de la capa vegetal no pasen a la capa aislante así como a la estructura portante, es muy importante que esta capa sea de materiales que sean resistentes e impermeables. Para el mercado guatemalteco no se cuenta con una membrana exclusiva que sea utilizada para techos verdes. En el mercado hay dos tipos de impermeabilizantes que cumplen con las especificaciones mínimas para esta capa en un techo verde.

Las soluciones alternativas son manto prefabricado con refuerzo de poliéster y membrana impermeable prefabricada de asfalto modificado con polímero APP (polipropileno atáctico), se sugiere la utilización de la membrana

prefabricada de asfalto por su alta resistencia y su facilidad para la instalación de la misma.

Esta solución es muy práctica ya que su superficie tiene una presentación de gravilla la cual permite que sea una excelente barrera antiraíz, se encuentran disponibles en grosores de 3,5 mm, 4,0 mm y 4,5 mm con refuerzo central de poliéster y acabado superior con gravilla, para el uso que se le dará a esta barrera se recomienda una presentación de 4,5 mm de grosor.

Figura 32. **Membrana impermeable prefabricada de asfalto modificado con polímero APP (PoliPropileno Atáctico)**



Fuente: http://per.sika.com/content/peru/main/es/RD-impermeabilizantes-techos/soluciones-sika-impermeabilizacion-techos/nuevo-impermeabilizacion-techos/sika-manto-membrana-asfaltica-impermeable/_jcr_content/parCenter/textimage/image.img-uncropped.1148.png.

Consulta: septiembre de 2016.

Esta capa debe instalarse por secciones, desde la parte inferior de la inclinación del techo hacia la parte más alta del techo para que el traslape quede a favor del desagüe.

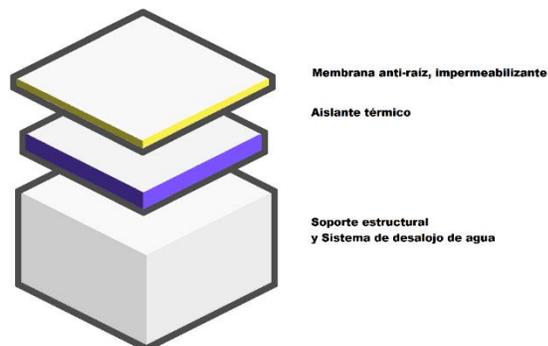
Una opción alternativa en el mercado es la aplicación de una emulsión asfáltica base agua y fibras sintéticas de refuerzo. La cual se aplica completamente en frío, las cualidades de esta emulsión asfáltica son similares a la membrana de asfalto, esta se aplica en líquido sobre la membrana o aislante térmico pero, a diferencia de la membrana de asfalto, es cuatro veces más cara.

Figura 33. **Aplicación de emulsión asfáltica a base de agua**



Fuente: http://mex.sika.com/content/mexico/main/es/group/sustainability/productos-certificados-sika/sika-manto-reflex/aplicacion-sika-manto-reflex/_jcr_content/parCenter/textimage_0/image.img-uncropped.1148.png Consulta: septiembre de 2016.

Figura 34. **Sección del diseño del techo verde (membrana anti-raíz, impermeabilizante)**



Fuente: elaboración propia.

4.1.6. Capa drenante

Esta capa como ya se ha determinado en el punto 2.1.5 en la definición de la capa drenante, las soluciones para el mercado guatemalteco son limitadas lo cual se elegirá un drenaje nodular de polietileno (geotextil) de alta densidad, este tipo de drenajes son utilizados para terrenos donde la precipitación es muy alta.

La ventaja para esta solución de drenaje que su estructura es altamente resistente ya que es utilizada bajo concreto de cimentación, donde su resistencia a la compresión puede llegar a los 150 kN/m² y su capacidad de drenaje es de 5 L/(s·m).

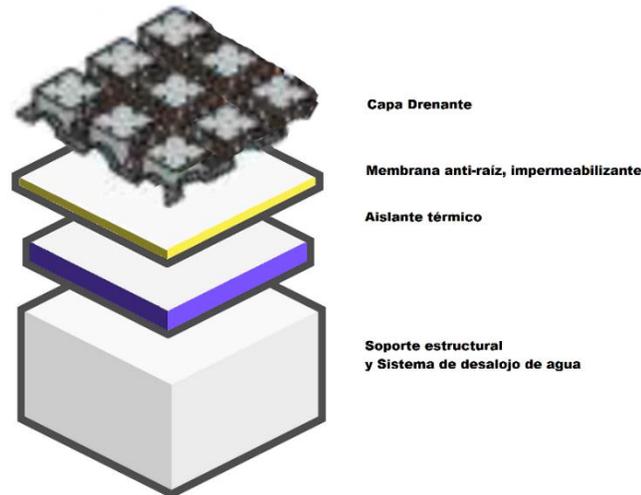
En la instalación de esta capa se debe considerar los traslapes de las secciones (en techos de gran área) los cuales pueden ser cubiertos por cinta autoadhesiva para techos.

Figura 35. **Sellado de traslape de secciones de drenaje nodular**



Fuente: <http://www.bolbrugge.com/descargas/carpetanueva.pdf>. Consulta: septiembre de 2016.

Figura 36. **Sección del diseño del techo verde (capa drenante)**



Fuente: elaboración propia.

4.1.7. **Capa filtrante**

Esta capa es la primera que tiene contacto con el sustrato, tiene el trabajo más duro ya que filtrará el agua desde el sustrato hacia la capa drenante, la cual no debe dejar pasar más que el agua y debe resistir las raíces y otros elementos que el sustrato pueda contener.

En el punto 2.1.6 en la definición de la capa filtrante citamos a Mayorga en su estudio titulado *aplicación arquitectónica de los geosintéticos en Guatemala (arquitectura paisajista, techos verdes y estabilización de suelos)*, cataloga esta capa filtrante como geoespaciador, en donde recomienda un geotextil de la familia de Macdrain.

Tomando en cuenta este geotextil en el mercado guatemalteco se utiliza, para canchas de gramilla sintética la cual, considerando la alta demanda en resistencia a que están sujetos estos geotextiles para este tipo de áreas, es una solución muy conveniente para la filtración del sustrato en los techos verdes. En

su tecnología *MacDrain*, es el geosintético que más se adapta a la necesidad filtrante del sustrato del techo verde.

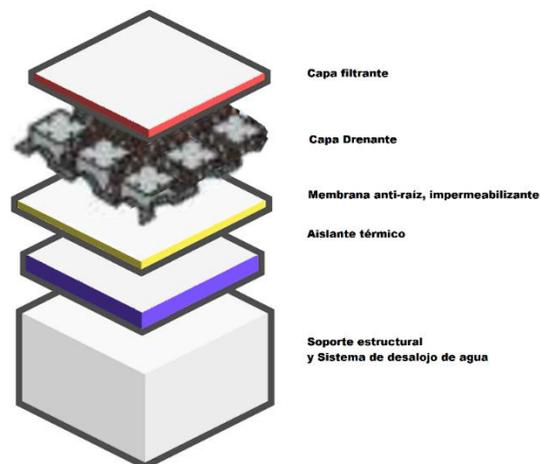
La colocación de esta capa debe realizarse con un traslape mínimo de 15 cm sobre la capa drenante y con una longitud 10 cm mayor que el sustrato, y queda como una banda lateral.

Figura 37. **Geosintético MacDrain**



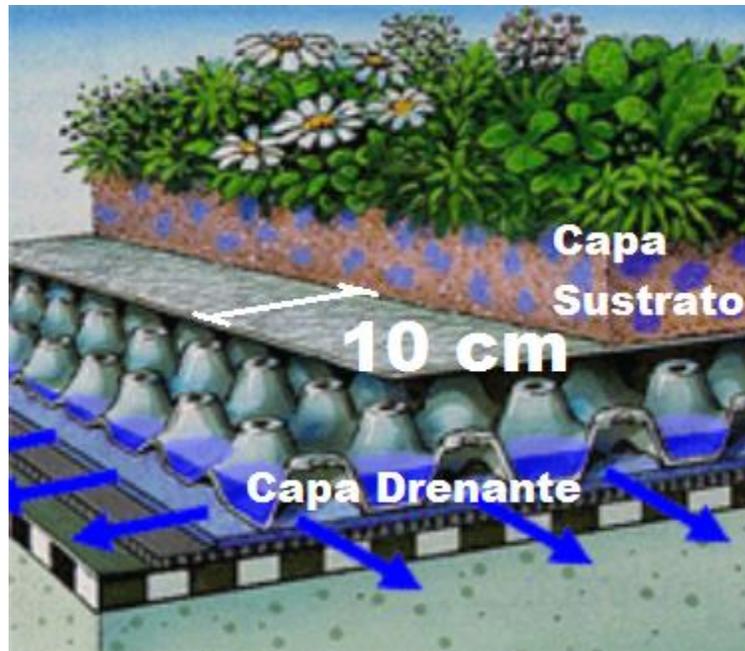
Fuente: <http://www.maccaferri.com/mx/wp-content/uploads/2014/11/MacDrain.jpg>. Consulta: septiembre de 2016.

Figura 38. **Sección del diseño del techo verde (capa filtrante)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Sección de instalación de capa filtrante**



Fuente: elaboración propia.

4.1.8. **Capa de sustrato**

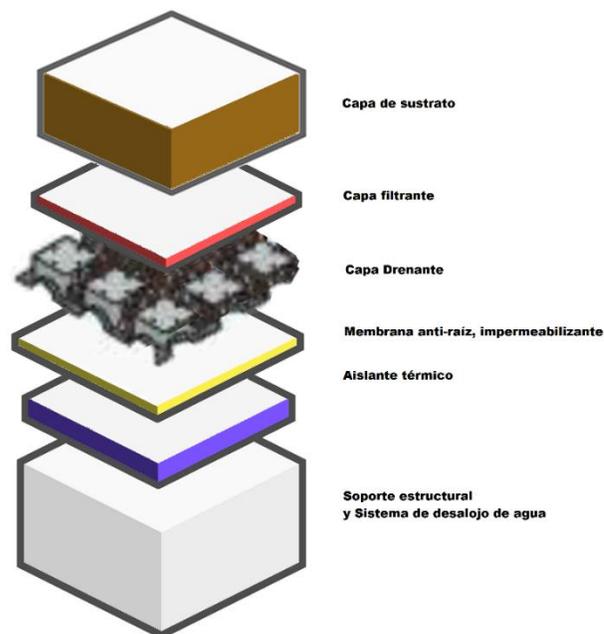
La capa de sustrato es la capa vital en la estructura del techo verde, la cual mantendrá integra la capa de vegetación así como proveerá todos los nutrientes a la misma y permitirá que los excesos de agua, pasar a la capa filtrante para su desagüe posterior. En Guatemala se utilizan muchos tipos de sustratos para todo tipo de plantaciones de tipo productivo el cual cada cual tiene sus características especiales para ayudar a la producción de cada cultivo.

Para plantaciones de tipo ornamental también existen varios tipos de sustratos que permiten proporcionar los mejores nutrientes a las plantas, en Guatemala se utilizan sustratos convencionales (50 % de broza, 30 % de tierra negra y 20 % de arena cuaternaria) y se está utilizando sustrato alternativo de fibra de coco, la turba del coco pertenece a la familia de las fibras duras como el

henequén. Se trata de una fibra compuesta por celulosa y leño, que posee baja conductividad, resistencia al impacto, a las bacterias y al agua.³⁷

Héctor Vargas en su trabajo *diagnóstico de la producción de plantas ornamentales de los viveros de la Municipalidad de Guatemala*, describe cómo realizar la mezcla de sustratos para la producción de plantas ornamentales donde se consideró la mejor opción local para la implementación de techos verdes. Para la preparación de un adecuado sustrato se mezclan de los materiales vegetales con arena blanca en la proporción 2:1, utilizando 0.37 m³ de los siguientes materiales: Estopa de coco, aserrín de pino, *peat moss* y tierra negra además de 0.72 m³ de arena blanca para mezclar 0.18 m³.

Figura 40. **Sección del diseño del techo verde (capa de sustrato)**



Fuente: elaboración propia.

³⁷ QUIÑÓNEZ, Mario. *Uso de la fibra de coco como sustrato en la producción de pascua (Euphorbia pulcherrima; WILD.EX KLOTSCCH) para exportación; agroindustrias JOVISA, San Miguel Dueñas, Sacatepéquez (2007-2010) estudio de caso.* p. 17.

4.1.9. Capa de vegetación

La vegetación por plantar debe ser de especies propias del área en donde se va a instalar el techo verde, tanto para mantener la biodiversidad del área, así como su adaptación al ambiente. En Guatemala la vegetación es altamente variada y la adaptación de las plantas al ambiente es alta, se recomienda plantar especies cuyas raíces no requieran de mucho espacio, para un techo verde de características ornamentales, se puede mencionar:

- *Stenotaphrum secundatum*: en todo tipo de jardín a nivel de suelo es común el pasto, césped, gramilla o grama, la cual en Guatemala la especie más común es la llamada “grama San Agustín” (*Stenotaphrum secundatum*), la cual se puede obtener una superficie muy ornamental a la vista, entre sus características tenemos: tiene hojas lisas y angostas, de coloración verde oscura. Es rizomatosa, es decir, el tallo queda bajo el suelo y emite las hojas hacia arriba. No profundiza demasiado en el terreno aproximadamente dos pulgadas. Da una espiga de 4 a 15 cm de longitud, soporta tráfico liviano.

Tolera pleno sol o media sombra y se considera una de las especies más tolerantes a la sombra. Se le encuentra en la naturaleza en suelos calcáreos o silicosos cerca de la costa; cultivada se da bien en una gran variedad de suelos, desde arcillosos hasta ligeramente arenosos. Prospera en suelos de poco a muy fértiles, con pH de 5 a 8,5.

Figura 41. ***Stenotaphum secundatum* (Grama San Agustín)**



Fuente:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/00/Staugustinegrass.JPG/250px-Staugustinegrass.JPG>. Consulta: septiembre de 2016.

- *Catharanthus roseus*: nombre común: Vinca de Madagascar, es un arbusto o planta herbácea, el cual se dispone en pares opuestos, este tipo de arbusto la podemos encontrar comúnmente en los jardines a nivel de suelo, en Guatemala se le conoce coloquialmente como “chatia”. Este tipo de arbusto su raíz es generalmente de poca profundidad, siempre verde, que alcanza una altura de 1 m. Las hojas son de ovals a oblongas, de 2,5 a 9 cm de longitud y de 1 a 3,5 cm de anchura, de color verde brillante, sin pelos, con un nervio central pálido y un corto peciolo de 1 a 1,8 cm de longitud; se disponen en pares opuestos.

Planta originariamente perenne, pero que ha sido cultivada como anual. La cantidad de luz que requiere o radiación solar es normal y se puede conservar bajo la sombra. Soportan temperaturas hasta 5°C, requiere un riego de cada dos o tres días en temporada calurosa y en invierno el riego es más espaciado hasta por cada semana. Germina en 10-20 días a 18-24°C

Figura 42. ***Catharanthus roseus*** (Vinca de Madagascar)



Fuente: [http://2.bp.blogspot.com/-](http://2.bp.blogspot.com/-Z0swlsr0AbA/Te5roy9nFsl/AAAAAAAAADLI/IBd4bT6tBzg/s640/DSC_0457_1024x680.jpg)

[Z0swlsr0AbA/Te5roy9nFsl/AAAAAAAAADLI/IBd4bT6tBzg/s640/DSC_0457_1024x680.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-Z0swlsr0AbA/Te5roy9nFsl/AAAAAAAAADLI/IBd4bT6tBzg/s640/DSC_0457_1024x680.jpg).

Consulta: septiembre de 2016.

- *Gardenia Jasminoides*: su nombre común es igualmente gardenia, es otra planta muy común en Guatemala a pesar de ser de origen chino, es un arbusto de hojas perennes de colores verde claro, brillantes y lisas. Sus flores son blancas, similares a las rosas y se usan comúnmente como plantas ornamentales.

Las gardenias son plantas que se cultivan en condiciones de alta temperatura (19-25°C), lo que permite su crecimiento al exterior.

Figura 43. ***Gardenia Jasminoides* (Gardenia)**



Fuente:

<http://www.theplantingtree.com/media/catalog/product/cache/1/image/1920x/04f3d080fa2c94223fead33caa313382/f/r/frost-proof-gardenia-2.jpg>. Consulta: septiembre de 2016.

- *Aphelandra squarrosa*: la Afelandra es un pequeño arbusto de hábito bastante erecto. Crece y florece fácilmente si se le procura calor, mantillo y atmósfera húmedos, y buena luz durante todo el año. Especie de ambientes tropicales, la cual llega a tener una altura de 30 a 40 centímetros. La temperatura en la cual esta planta sobrevive se encuentra entre los 17°C y 27°C, el riego para este tipo de planta es de cinco a una semana en temporada cálida y cada 1 a 1,5 semanas en época de invierno.

Figura 44. ***Aphelandra squarrosa*** (Afelandra)



Fuente: [http://4.bp.blogspot.com/-](http://4.bp.blogspot.com/-e1j52pVRjgg/UdmrcPUpTLI/AAAAAAAAAOWU/jQdY8D20L00/s400/AURIANTICA.jpg)

[e1j52pVRjgg/UdmrcPUpTLI/AAAAAAAAAOWU/jQdY8D20L00/s400/AURIANTICA.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-e1j52pVRjgg/UdmrcPUpTLI/AAAAAAAAAOWU/jQdY8D20L00/s400/AURIANTICA.jpg). Consulta: septiembre de 2016.

- **Cactaceae:** nombre común cactáceas, son una familia de plantas suculentas y, en gran mayoría, espinosas, conocidas en conjunto como cactus o cactus. Un cierto número de especies se cultivan como plantas de interior, así como en jardines ornamentales. Las cactáceas son plantas con una gran cantidad de especies, de diferentes tamaños, formas y con diferentes flores.

La frecuencia de riego depende del tipo de suelo y capacidad de retención de agua, humedad y temperatura de la zona. La mayoría de especies se riegan con una frecuencia de 10 a 12 días y en la temporada cálida cada cuatro a ocho días y en épocas frías de 20 a 40 días. En temperaturas a

inferiores de 10°C no se deben regar porque se pudren. Las cactáceas no se riegan directamente ya que por su forma el agua la aprovechan desde la raíz lo cual se debe de regar el volumen del suelo. La radiación solar va a depender de la especie, se debe considerar que las especies provistas de pelos, espinas muy fuertes o muchas espinas requieren radiación solar directa, mientras las especies con pocas espigas y crasas requieren cierta sombra.

Figura 45. **Cactaceae (Cactáceas)**



Fuente: [http://2.bp.blogspot.com/-j2W2-](http://2.bp.blogspot.com/-j2W2-ENQ338/UXms7mXeeMI/AAAAAAAAADQ/NCMqZ7281Lg/s200/cactus-crasas-y-suculentas-mini-envase-n9-muy-decorativos_MLA-F-3248557616_102012.jpg)

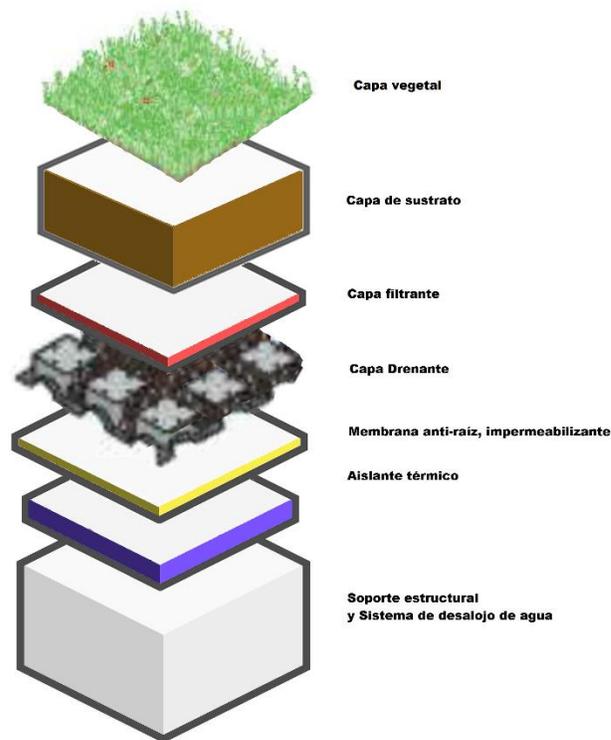
[ENQ338/UXms7mXeeMI/AAAAAAAAADQ/NCMqZ7281Lg/s200/cactus-crasas-y-suculentas-mini-envase-n9-muy-decorativos_MLA-F-3248557616_102012.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-j2W2-ENQ338/UXms7mXeeMI/AAAAAAAAADQ/NCMqZ7281Lg/s200/cactus-crasas-y-suculentas-mini-envase-n9-muy-decorativos_MLA-F-3248557616_102012.jpg). Consulta: septiembre de 2016.

Si se considerará implementar un techo verde con características hortícolas, se debe tomar en cuenta las cualidades de un techo verde de este tipo, la profundidad del sustrato, el tipo de sustrato por utilizar para la producción hortícola, el mantenimiento y tiempo de cosecha para cada una de las especies por plantar. Para tener una referencia de las especies que se pueden utilizar en este tipo de techo verde se tiene:

- *Crotalaria pumila* Ort: nombre común crotalaria. Esta leguminosa nativa de las orillas de parcelas y caminos, y arvense de milpas, es una planta comestible popular, en Guatemala se le conoce coloquialmente como chipilín.
- *Brassica oleracea*: nombre común col silvestre. Las coles son plantas bienales por lo que requieren de un período de vernalización para florecer. Se cultivan como bienales o como anuales dependiendo de la finalidad de su utilización, en Guatemala se le conoce comúnmente como repollo.
- *Brassica oleracea itálica*: nombre común brécol, pertenece a la familia de las Brassicaceae (Crucíferas). Esta planta ha sido calificada como la hortaliza de mayor valor nutritivo por unidad de peso de producto comestible, en Guatemala se le conoce comúnmente como brócoli.
- *Raphanus sativus*: nombre común rábano. Pertenece a la familia de las Brassicaceae que se cultiva por sus raíces comestibles. Una de las propiedades fundamentales de la hortaliza, reside en que contienen unos compuestos de azufre, considerados como potentes antioxidantes que ayudan a prevenir enfermedades.
- *Brassica rapa*: nombre común nabo. Es una hortaliza que se adapta muy bien a los climas fríos. Pertenece a la familia de las crucíferas. La importancia de esta familia de hortalizas, a la que también pertenecen las coles y los berros.

- *Lactuca sativa*: nombre común lechuga. Es una planta anual, propia de las regiones semitempladas, perteneciente a la familia de las *compositae*, se cultiva con fines alimentarios. Debido a las muchas variedades que existen, y a su cultivo cada vez mayor en invernaderos, se puede consumir durante todo el año.

Figura 46. **Sección del diseño del techo verde (capa de sustrato)**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Mantenimiento del techo verde

El mantenimiento del techo verde es necesario, ya que por ser una capa viva en la superficie del techo del inmueble debe ser monitoreado en cada una de sus capas y tener un mantenimiento de su capa de vegetación como cualquier jardín.

Por el tipo de techo verde seleccionado, se prefiere el techo verde extensivo el cual es de son los que requiriere de un mantenimiento no muy riguroso. Una vez la vegetación cubre entre el 60–70 % de la superficie, (momento en que se da por concluida la implantación), los trabajos de mantenimiento se limitarán a tres o cuatro visitas anuales, en las que se controlará, por una parte, la aparición de plantas adventicias, las necesidades de riego y el crecimiento de la vegetación en zonas no deseadas; por otro lado, “se realizará un control riguroso del estado de limpieza de los canales de desagüe, sumideros, gárgolas, etc.”³⁸

“El techo verde no debe ser cortado muy a menudo. Esto trae aparejado, por un lado, el peligro de que se seque demasiado rápido y por otro, que se pierda sustancia orgánica. Si se corta muy a menudo, el sustrato debería ser abonado para mantener el equilibrio ecológico.”³⁹

Para el mantenimiento de los prototipos de techo verde se seleccionará a partir del momento de la implantación, mantenimientos cada mes durante los primeros seis meses y después de cumplido este período se serializarán mantenimientos cada tres meses.

Para el mantenimiento se seleccionara personal adecuado para la inspección y que pueda ejecutar acciones preventivas y correctivas para que la capa de vegetación se mantenga saludable y libre de cualquier elemento que pueda afectar su crecimiento y mantenimiento. Para la selección del personal referirse al capítulo 4.3.2 Recurso humano.

³⁸ ZINCO. <http://www.zinco-cubiertas-ecologicas.es>. Consultado: agosto de 2016.

³⁹ MINKE, Gernot. Op. cit. p. 80.

4.3. Presupuesto

Los prototipos de techo verde, con las características descritas y con los elementos sugeridos, considerando los elementos para la estructura portante de mejor calidad y más accesibles en consideración al precio de cada elemento, se desglosan el siguiente presupuesto:

Tabla XIII. Desglose de costos para el prototipo de techo verde

Material	Costo unitario	Cantidad	Costo total
Placas de teknomuro gris	Q.14.46	74	Q.1 070,04
Postes H de 2.00	Q.95.20	2	Q.190,4
Postes H de 1.80	Q.85.68	1	Q.85,68
Postes H de 2.20	Q.104.72	1	Q.104,72
Postes esquineros 1.80	Q.85.68	2	Q.171,36
Postes esquineros 2.20	Q.104.72	2	Q.209,44
Vigueta	Q.110.25	5	Q.551,25
Bovedilla	Q.22.30	40	Q.892
Madera tratada	Q.75.00	8	Q.600
Lámina galvanizada	Q.146.00	3	Q.438
Clavos 2" (libra)	Q.7.50	2	Q.15
Armellas	Q.3.75	2	Q.7,5
Impermeabilizante (mts ²)	Q.105.07	5	Q.525,35
Drenaje para techo (mts ²)	Q.34.50	5	Q.304,5
Filtrante (mts ²)	Q.60.90	5	Q.375
Canaleta de desagüe	Q.75.00	1	Q.75
Tubería de desagüe	Q.25.00	1	Q.25
Codo de desagüe	Q.15.00	1	Q.15
Sustrato (mts ²)	Q.25.00	5	Q.125
Cemento	Q.150.00	2	Q.300
Vegetación (mts ²)	Q.30.00	5	Q.150
Total			Q.6 230,24

Fuente: elaboración propia.

La instrumentación por utilizar para la medición de los beneficios de los techos verdes se encuentra los siguientes:

Figura 47. **Termohigrómetro (PCE-FWS 20)**



Fuente: https://www.pce-instruments.com/espanol/slot/4/artimg/large/pce-instruments-termohigr_metro-pce-fws-20-99032_894587.jpg. Consultado: agosto de 2016.

Figura 48. **Termómetro de globo**



Fuente: https://www.pce-instruments.com/espanol/slot/4/artimg/normal/pce-instruments-term_metro-pce-wb-20sd-1899914_832405.jpg. Consultado: agosto de 2016.

Tabla XIV. **Desglose de costos de instrumentos de medición para prototipos de techos verdes**

Elemento	Precio
Termohigrómetro PCE-FWS 20	Q. 2 310,00
Termómetro de globo PCE-WB 20 SD	Q. 3 260,95
Total	Q. 5 570,95

Fuente: elaboración propia

El total de presupuesto para la implementación de los prototipos del techo verde, es de Q. 11 801,19 (no se cuentan los costos de mano de obra y de instalación).

4.4. Metodología de monitoreo

El monitoreo es esencial para obtener datos con un alto índice de exactitud y apegados a la realidad de lo que se está midiendo. La metodología por implementar se debe considerar varios factores en los cuales se aconseja evaluar:

- Crecimiento de la capa vegetal
- Temperatura interior
- Temperatura exterior
- Velocidad del viento
- Precipitación pluvial
- Radiación térmica
- Confort térmico

Para la obtención de los datos como: temperatura interior, temperatura exterior, velocidad del viento, precipitación pluvial, no es necesario medirlos presencialmente ya que el instrumento propuesto (termohigrómetro PCE-FWS 20), cuenta con memoria interna y el instrumento es fijo dentro del prototipo.

En cuanto los datos de radiación térmica, confort térmico deben realizarse presencialmente el instrumento propuesto (termómetro de globo PCE-WB 20 SD) se cuenta con memoria pero no es una estación fija, debe realizarse en intervalos de tiempo adecuados para que su medición pueda realizarse exactamente a las horas propuestas.

La medición del crecimiento de la capa vegetal debe realizarse presencialmente, y esta se puede hacer en los intervalos de tiempo en cuanto al mantenimiento del techo verde.

Las mediciones se utilizarán para realizar análisis de reducción de temperatura (ver capítulo 6) con datos reales en Guatemala y obtener todos los datos posibles para futuros estudios, los cuales puedan estar disponibles para su uso.

4.5. Hojas de control

Las hojas de control son herramientas que permitirán recolectar la información de los instrumentos y poder contar con la información por escrito y comprobar que la información es verídica y exacta con respecto a las mediciones realizadas.

En la utilización del termohigrómetro la información es descargada en forma digital directamente del equipo por lo cual las hojas se tendrán en formato electrónico y no es necesario hojas físicas para su almacenamiento o consulta.

Para los datos obtenidos por medio del termómetro y la medición del crecimiento de la capa vegetal serán necesarias hojas de control que permitan, de una forma fácil, la recopilación de la información así como la interpretación de la misma y llevar un control de la persona que recoge los datos sea la persona idónea para la recopilación de la misma. A continuación se presenta una hoja de control para la recopilación de la información de los instrumentos por utilizar en la medición de las condiciones de prototipos de techo verde.

Figura 49. **Hoja de registro y control de prototipos de techo verde**

Hoja de registro y control de prototipos de techos verde								
Prototipo:		Ubicación:						
No.	Fecha y hora	Temperatura del aire (Interior) °C	Temperatura del Globo negro (°C)	Humedad (Interior) h.r	Temperatura de punto de rocío °C	Temperatura de bulbo húmedo (WBGT) °C		Firma de quien realiza la medición
						Interior	Exterior	
Crecimiento de la capa vegetal								
No.	Fecha	Crecimiento en cm	Observaciones					

Fuente: elaboración propia.

4.6. Recurso humano

El recurso humano necesario para la implementación de los prototipos de techo verde será dividido en tres áreas:

- Administración del proyecto de prototipos de techo verde.
- Construcción del prototipo de techo verde.
- Monitoreo y mantenimiento de prototipos de techo verde.

Para la administración del proyecto de prototipos de techo verde, se sugieren dos personas que lleven desde un inicio el control y la ejecución del proyecto de prototipos de techo verde. Estas personas deben de tener conocimientos sobre el tema, idealmente estudiantes de ingeniería con pensum cerrado o el último año de ingeniería industrial, Ingenieros industriales o afines.

Para la construcción del prototipo de techo verde, se sugiere un grupo de personas (de tres a cinco personas), con conocimientos de albañilería y construcción para realizar la elevación y asegurar que el prototipo sea construido de una forma correcta y segura (considerar que este personal será temporal en el período en el que el prototipo sea construido y que se compruebe que resiste adecuadamente los pesos de las capas que componen el techo verde en estado seco y de saturación).

Para el monitoreo y mantenimiento de prototipos de techo verde, se sugieren un grupo de personas (de dos a tres personas), con estudios en ingeniería industrial (estudiantes del área profesional de Ingeniería Industrial) y que sean capacitadas por los administradores del proyecto en el manejo, interpretación y utilización de los equipos de medición, que cuenten con tiempo disponible y responsables para poder realizar las mediciones presenciales.

5. ANÁLISIS DE FACTORES AMBIENTALES POR IMPACTAR EN PROTOTIPO DE TECHO VERDE

Se analizarán factores ambientales que permitan plantear y comprobar una hipótesis basada en la teoría recolectada y los datos obtenidos de estudios realizados en países de Latinoamérica, en donde la instalación de techos verdes se ha realizado desde el inicio del estudio y se han monitoreado las condiciones ambientales dentro de las edificaciones en donde se ha instalado.

Para el presente estudio se realizará un modelo estadístico matemático que permita comprobar la siguiente hipótesis:

- Hipótesis

Se puede reducir la temperatura dentro de una edificación de 3°C a 5°C, con la instalación de un techo verde en la infraestructura de la misma.

- Hipótesis nula

No hay una reducción en la temperatura interna de una edificación al instalar un techo verde.

El análisis de factores ambientales que permitirá comprobar la hipótesis planteada, determinar la sustentabilidad de un proyecto de techo verde así como su rentabilidad. Se tomará en cuenta los siguientes factores:

5.1. Temperatura

La temperatura es el factor más importante en la determinación de los beneficios de la implementación de techos verdes en cualquier infraestructura. Como ya se ha visto dentro de los beneficios de los techos verdes todos los autores concuerdan en que la reducción en la temperatura interna de una edificación con techo verde es de 3°C a 5°C.

Una planta extrae el calor de su ambiente por medio de la evaporación de agua, la fotosíntesis y la capacidad de almacenar calor de su propia agua. Este efecto de enfriamiento, que se hace perceptible fundamentalmente en los días cálidos de verano, puede demandarle el 90% de la energía solar consumida. Con la evaporación de un litro de agua son consumidos casi 2,2 MJ (530 kcal) de energía.⁴⁰

La condensación del vapor de agua en la atmósfera, pasa a formar nubes, donde la misma cantidad de energía calórica es liberada nuevamente. Lo mismo sucede cuando por la noche se condensa la humedad en las plantas. La formación del rocío matinal en fachadas y techos verdes trae aparejada una recuperación del calor. Por lo tanto, las plantas solas pueden a través de la evaporación y la condensación de agua, reducir las oscilaciones de temperatura. Este proceso se fortalece aun más por la gran capacidad de almacenamiento de calor del agua existente en las plantas y en el sustrato, como así también a través de la fotosíntesis, ya que por cada molécula de $C_6H_{12}O_6$ (glucosa) generada son consumidos 2,83 kJ de energía.⁴¹

⁴⁰ MINKE, Gernot. Op cit. p. 13.

⁴¹ Ibid.

“Para Guatemala se espera que, a partir de la presente década hasta la década de 2060, haya una variación de la temperatura de -1°C hasta $+3^{\circ}\text{C}$ ”⁴², por lo cual es muy importante analizar este factor ambiental.

5.2. Ruido

El ruido en las ciudades es un factor importante, ya que es casi imposible una ciudad sin ruido.

“Los techos verdes tienen una atenuación del ruido exterior, especialmente para los sonidos de baja frecuencia. Un techo verde extensivo puede reducir el sonido desde el exterior por cuarenta decibelios, mientras que uno intensivo puede reducirlo a 46-50 decibelios.”⁴³

Las plantas reducen el ruido mediante la absorción (transformación de la energía sonora en energía de movimiento y calórica), reflexión y deflexión (dispersión).

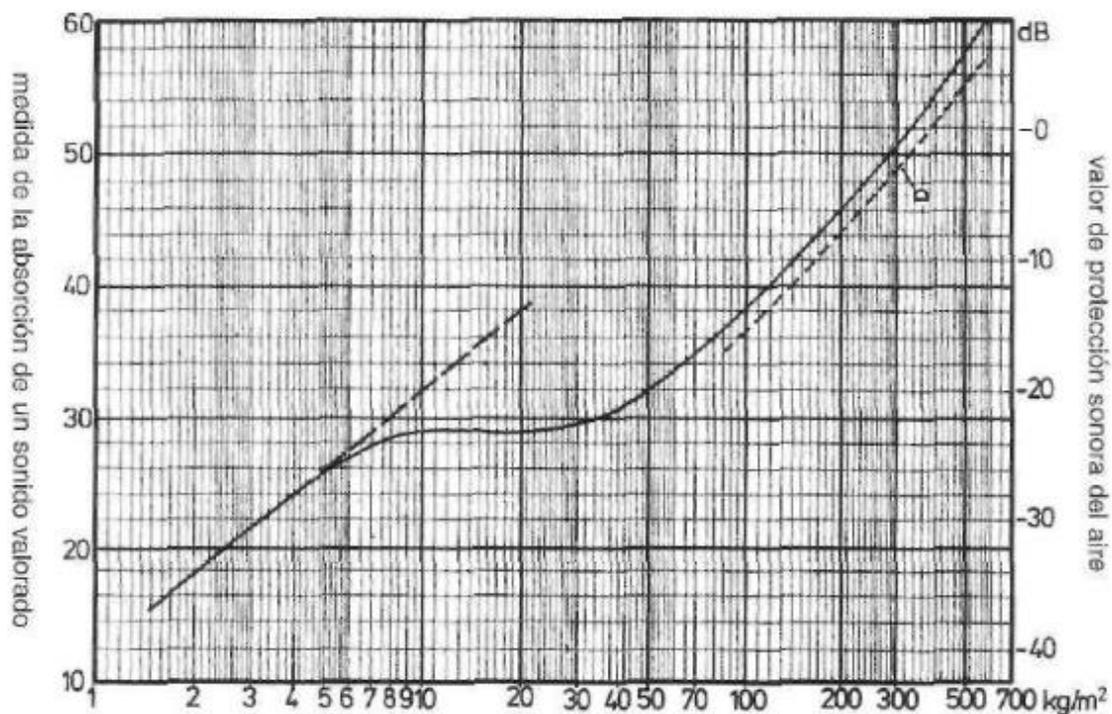
Investigaciones de un laboratorio suizo dieron como resultado, que una pesada alfombra con base de fieltro tiene menos capacidad de absorber el sonido que un césped. Mediciones sobre un techo plano enjardinado de un hospital en Karlsruhe (Alemania), muestran que, en las fachadas ubicadas en las inmediaciones del jardín del techo, a consecuencia de la absorción y la reflexión disminuida, el ruido baja alrededor de 2-3 dB.

⁴² OSGLESBY, Robert; ROWE. *Clinton. Informe final impactos climáticos para Guatemala: resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5*. p.33.

⁴³ PECK, Steven; et al. *Greenbacks from Green roofs: Forging a new industry in Canada*. p. 30.

Por lo tanto, son reducidas más pronunciadamente las frecuencias altas que se consideran especialmente molestas (Mürb 1981). En los techos verdes, en general, no es decisivo el efecto de absorción acústica de las plantas, sino del sustrato sobre el cual las plantas crecen. Para un ángulo vertical de incidencia del sonido, la capa de plantas consigue por absorción solo una insignificante disminución del sonido de alta frecuencia, mientras que la absorción acústica de la capa de tierra para un espesor de 12 cm asciende, aproximadamente, a 40 dB y para un espesor de 20 cm, aproximadamente 46 dB⁴⁴

Figura 50. **Dependencia de la aislación acústica del aire con el peso de las superficies**



Fuente: MINKE, Gernot. Op. cit. p. 17.

⁴⁴ MINKE, Gernot. Op cit. p. 17.

Los efectos de la contaminación acústica en Guatemala se evidencian principalmente en el área urbana, debido al constante y pujante crecimiento industrial, a la falta de educación, el irrespeto al derecho ajeno, y a la carencia de una legislación eficiente en materia ambiental. Los capitalinos se han transformado paulatinamente en las víctimas principales de este contaminante, el cual no solo se ha evidenciado por sus efectos negativos en la salud de la población, sino también en aspectos de carácter socioeconómico que van, desde una disminución en la productividad laboral hasta el deterioro, devaluación y abandono de viviendas.

Conscientes de lo anterior, algunas instituciones o instancias sociales han tratado, sin logros significativos, advertir sobre los efectos negativos de la contaminación por ruido y su aumento gradual. Entre estas instituciones puede mencionarse la División de Salud del Consejo de Bienestar Social de Guatemala, que durante 1976-1977 estudió el impacto del ruido en el equilibrio emocional del guatemalteco, o la investigación del Instituto de Seguridad Social que, en agosto de 1978, se dio a la tarea de determinar la intensidad y frecuencia del ruido a distintas horas en algunos cruceros de las arterias más importantes de la capital a distintas horas, concluyendo en que el 80 % de los cruceros estudiados excedían el umbral de 80 decibeles.⁴⁵

⁴⁵ SANTOS, Ana Lucía. *La sinfonía de los sordos: el problema del ruido en la ciudad de Guatemala*. p. 30.

5.3. Humedad

Los techos verdes, por ser cubiertas vegetales, ayudan al aumento o reducción de la humedad dependiendo de la estación climática del lugar donde se encuentren instalados.

La vegetación reacciona dependiendo la humedad en el ambiente, en estaciones climáticas secas o en áreas secas la vegetación evapora el agua contenida en sus raíces y, de esta forma, aumenta la humedad relativa del aire. En estaciones climáticas húmedas o en áreas húmedas, la vegetación realiza un proceso llamado formación de rocío donde condensa la niebla para que esta forme gotas de agua que se filtren hacia la capa de sustrato.

En estudios realizados en Kassel, Alemania por Robinette en 1972 se observó que durante la época de sequía, la vegetación evapora aproximadamente 1, 500,000 litros de agua por cada hectárea, y cuando existe demasiada humedad en el aire la vegetación de un metro cuadrado puede transformar hasta ½ litro de agua de rocío.

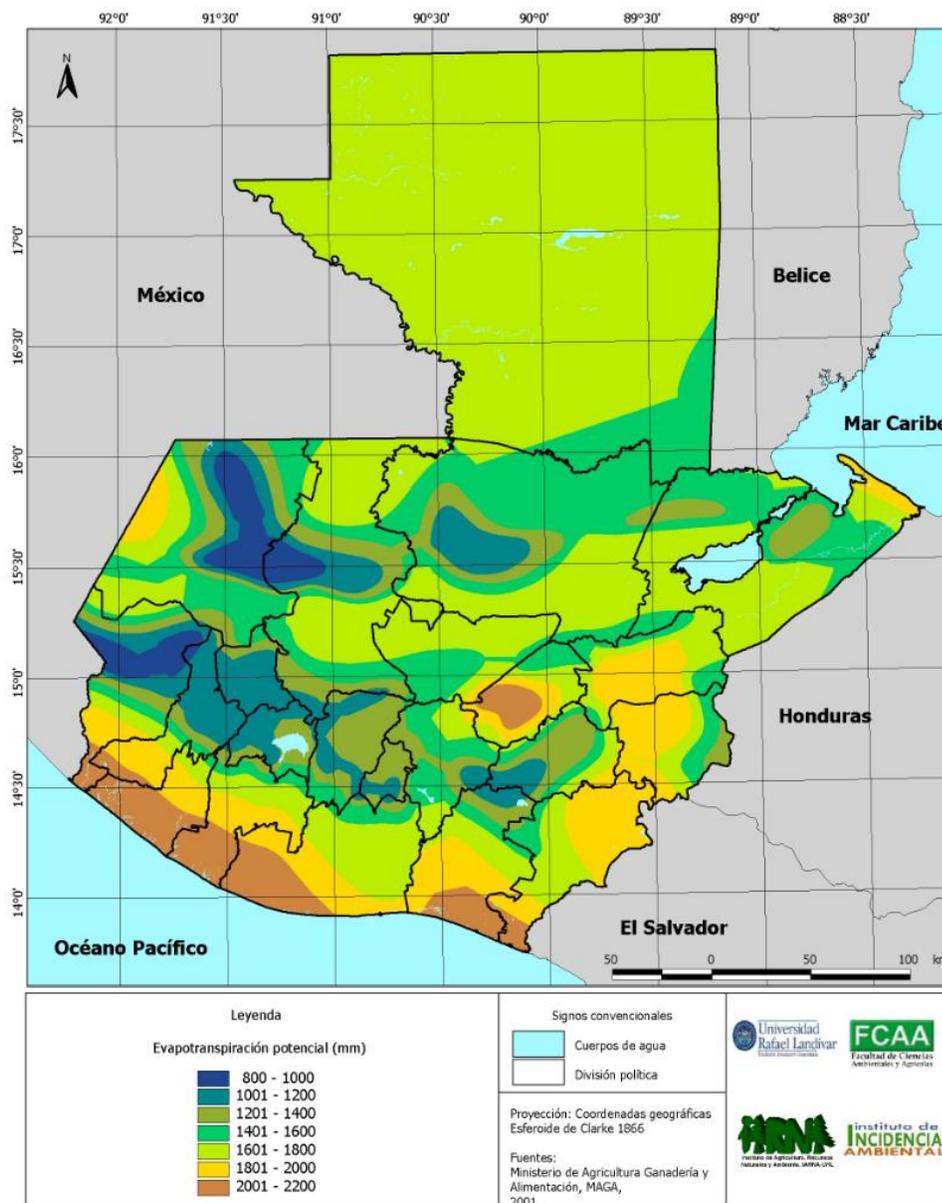
“En Guatemala la evapotranspiración se convierte en potencial al considerarse como variante la cantidad máxima de agua susceptible a perderse en fase de vapor, bajo un clima dado y por una cobertura vegetal continua y bien alimentada de agua”⁴⁶.

Los mayores valores de evapotranspiración se presentan en la planicie costera del Pacífico, regiones del oriente y en Petén, mientras magnitudes más

⁴⁶ IRNA. *Estado actual del clima y la calidad del aire en Guatemala.* p. 27.

bajas se presentan en las zonas montañosas y el área de la meseta central de la ciudad de Guatemala.

Figura 51. Evapotranspiración potencial en Guatemala



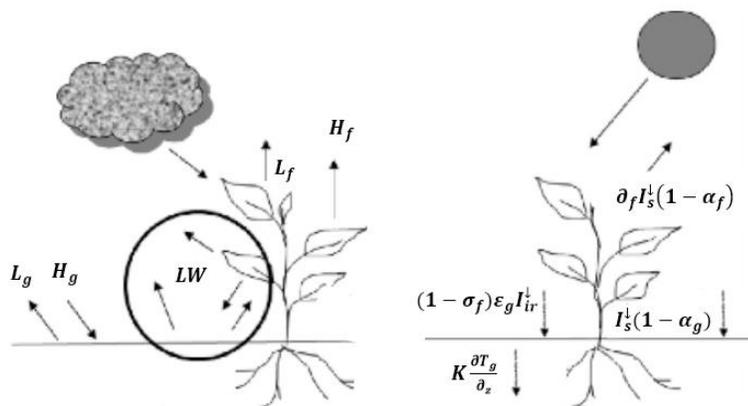
Fuente: IRNA. *Estado actual del clima y la calidad del aire en Guatemala*. p. 200.

5.4. Radiación solar

La radiación solar, es una serie de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. Estas radiaciones son energía pura que por medio de procesos de conducción y convección genera flujo de calor en las áreas donde estas radiaciones chocan con una superficie, aumentando la temperatura dentro de las edificaciones.

En el programa de simulación térmica realizado por D. J. Sailor titulado *A Green roof model for building energy simulation programs* se propone un modelo matemático por medio de un software de simulación, donde toma el intercambio que se lleva a cabo por radiación de onda larga y onda corta, bajo la cobertura o sombra que crean las plantas; los efectos de esta cobertura en la transferencia de calor por convección; evapotranspiración del suelo y vegetación y, finalmente, conducción y almacenamiento de calor en todas las capas del techo verde.

Figura 52. Esquema del balance energético para un techo verde



Fuente: SANCHEZ, Tonatiuh. *Evaluación de la tecnología de techos verdes como agentes ahorradores de energía.* p.21.

Dónde: L es el flujo latente de claro y H el flujo de calor sensible en $[\text{W}/\text{m}^2]$; I_s es la radiación entrante de onda corta e I_{ir} es la radiación entrante de onda larga en $[\text{W}/\text{m}^2]$ y LW es la radiación de onda larga bajo la cobertura o sombra de la vegetación.

σ_f es la fracción de cobertura; α representa el albedo; T_g es la temperatura del suelo; y ε_g la emisividad de la superficie del suelo.

Los subíndices f y g se refieren a las capas de follaje y suelo respectivamente.

Como lo indican los subíndices, el balance energético se divide en dos partes. Una para la capa de follaje o vegetación y otra para la capa de suelo. Para la capa de vegetación el balance energético queda de la siguiente manera:

$$F_f = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f$$

Además de la transferencia de calor por convección y flujo de calor sensible, esta ecuación toma en cuenta la radiación de onda corta y larga absorbida por la vegetación, incluyendo los efectos por reflexiones múltiples.

Para el suelo el balance energético queda como:

$$F_f = (1 - \sigma_f) [I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + k \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

En donde, para ambas ecuaciones, σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

Los términos de flujo de calor sensible y latente (H y L) de ambas ecuaciones así como la solución del balance de energía son complicados ya que contiene términos no lineales los cuales no se detallaran en el presente trabajo.

5.5. Caudal de descarga de agua de lluvia

Los techos verdes también tienen la cualidad de retención del agua, hasta cierto punto y esto depende del tipo de techo verde por instalar. El porcentaje de agua retenida por el techo verde será absorbida por el sustrato y sus capas posteriores y el porcentaje restante de la cantidad de agua precipitada sobre el techo verde será desalojado y descargado por el drenaje.

Tabla XV. **Porcentaje de retención de agua de lluvia por tipo de techo verde**

Tipo de techo verde	Porcentaje de descarga de desagüe
Extensivo	Espesor menor a 10 cm=70 %
	Espesor mayor de 10 cm=50 %
Semi – intensivo	40 %
Intensivo	30 %

Fuente: SANCHEZ, Irais. Op. cit. p. 40.

5.6. Consumo eléctrico

Las edificaciones en donde se instalan techos verdes se ven beneficiadas con el ahorro del consumo eléctrico por factores de ahorro de consumo por aires acondicionados, ventiladores o sistemas de enfriamiento dentro de las edificaciones. Cada edificación tendrá un comportamiento en cuestiones de ahorro energético por su diseño interior y el uso final del mismo.

En el estudio *Evaluación de la tecnología de techos verdes como agentes ahorradores de energía en México* presentado por Sánchez (2011); se observa que en la ciudad de México, se obtuvo una diferencia en el consumo eléctrico de 45 000 KWh, que representa un ahorro de 17 %. En Tijuana fue del orden de 39600 KWh, esto significa un ahorro del 15.6 %. Finalmente, en Cancún el ahorro alcanzó a ser de 76700 KWh, es decir, un 10 %. Esto representa un promedio de ahorro energético del 14.2 % de consumo eléctrico.

Según información del Programa integral de asistencia técnica y capacitación para la formación de especialistas en ahorro y uso eficiente de energía eléctrica de Guatemala, para una vivienda de una sola planta, de dos recamaras, sala, comedor cocina y baño, que cuenta con una unidad de aire acondicionado centralizada, con un consumo de 2142 kWh durante todo el año y durante el verano, el promedio bimestral es de 4450 kWh. Si se instalara un sistema de techo verde en lugar de un sistema de aire acondicionado el ahorro sería en relación con estos valores en la ciudad de Guatemala sería considerable.

5.7. Producción de oxígeno y limpieza del aire

La vegetación de un techo verde es muy importante en la generación de oxígeno dentro de las ciudades donde los espacios verdes son muy reducidos.

La vegetación por medio del proceso de fotosíntesis toma el CO₂ del ambiente y libera Oxígeno. Este proceso es llevado a cabo por medio de absorción del CO₂, Agua (H₂O) y consumo de energía. “Se ha comprobado que en un metro cuadrado de pasto se retiene anualmente aproximadamente 0.2kg de partículas suspendidas en el aire.”⁴⁷

La estimación de producción de oxígeno de las plantas va a depender de muchos factores en cuestiones de especie de planta, edad, tipo de suelo, precipitaciones, etc. Por lo cual no es posible estimar la producción de oxígeno por metro cuadrado.

La vegetación, además de la producción de oxígeno, limpia el aire. Un estudio realizado por la Universidad de Granada indica que un seto de un metro de alto y 0,75 metros de ancho reduce un 50 % a través de su efecto de filtro, la contaminación por plomo de la vegetación ubicada detrás de él.

⁴⁷ SANCHEZ, Irais. Op.cit. p. 71.

6. MODELO ESTADÍSTICO INFERENCIAL DEL IMPACTO DEL USO DEL TECHO VERDE EN GUATEMALA

Para la comprobación de la hipótesis planteada se modelará un análisis estadístico de regresión lineal múltiple mediante matrices por tener más de una variable independiente en el modelo de regresión.

- Hipótesis

Se puede reducir la temperatura dentro de una edificación de 3°C a 5°C, con la instalación de un techo verde en la infraestructura de la misma.

- Hipótesis nula

No hay una reducción en la temperatura interna de una edificación al instalar un techo verde.

En este modelo de regresión lineal múltiple, se tendrán k variables independientes x_1, x_2, \dots, x_k , y n observaciones y_1, y_2, \dots, y_k , cada una se puede expresar por la ecuación:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$$

En esencia, este modelo representa n ecuaciones que describen cómo se generan los valores de respuesta en el proceso científico. Con la notación matricial, se puede escribir las ecuaciones:

$$y = x\beta + \varepsilon$$

Donde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

Para la estimación de coeficientes del modelo estadísticos, se obtendrán los estimadores de mínimos cuadrados de los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ ajustando el modelo de regresión lineal múltiple.

$$\mu Y | x_1, x_2, \dots, x_k = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

A los puntos de datos

$$\{(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, y_i); \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y} \quad n > k\}$$

Donde y_i es la respuesta observada para los valores $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ de las k variables independientes x_1, x_2, \dots, x_k . Cada observación $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, y_i)$ satisface la ecuación

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$$

o

$$y_i = b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} \dots + b_k x_{ki} + e_i$$

Donde ε_i y e_i son los errores aleatorio y residual, respectivamente, asociados con la respuestas y_i . Al utilizar el concepto de mínimos cuadrados para llegar a los estimadores de b_0, b_1, \dots, b_k , se minimiza la expresión

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i} - \dots - b_kx_{ki})^2$$

Diferenciando SSE cada vez con respecto de $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$, e igualando a cero, se genera el conjunto de $k + 1$ ecuaciones normales

$$nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki} = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{ki} = \sum_{i=1}^n y_i x_{1i}$$

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{matrix}$$

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_{ki} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{1i} + b_2 \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{2i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_{ki}$$

Estas ecuaciones se pueden resolver para $a, b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$, por cualquier método apropiado de sistemas de ecuaciones lineales.⁴⁸

⁴⁸ WALPOLE, Ronald; MYERS Raymond. *Probabilidad y estadística*. p.421.

Se obtendrán los estimadores de mínimos cuadrados de cada coeficiente de regresión β_i . Se estima mediante b_i de los datos muestrales con el método de mínimos cuadrados.⁴⁹

6.1. Variables y datos

Las variables requeridas en el modelo estadístico requieren de una variable independiente que estará determinada por $y = \Delta T_1 =$ diferencia de temperaturas por edificaciones con techo y sin techo verde; y dos factores independientes de la variable independiente e independientes entre ellas, dado por: $x_1 =$ la temperatura media del lugar y $x_2 =$ la altura promedio del lugar.

Los datos se obtuvieron en estudios realizados anteriormente en otras ciudades de Latinoamérica en la ciudad de Caracas, Venezuela; en la ciudad de Tolima; Colombia; en Colima, México y la información de la temperatura ciudad de Guatemala. Las lecturas tomadas serán en grados *Celsius* ($^{\circ}\text{C}$)

⁴⁹ WALPOLE, Ronald; MYERS Raymond. *Ibíd.*

Tabla XVI. **Temperatura en la ciudad de Caracas, Venezuela del 1 al 9 de enero de 2009**

Día	Temperatura promedio (°C)
1	31,2
2	31,8
3	32,2
4	32,4
5	32,5
6	32,7
7	33,2
8	26,5
9	22,3

Fuente: ACUÑA, Ruben; ESTEVEZ, Carlos; *Factibilidad, diseño e instalación de un techo verde en el edificio de postgrado de la Universidad Católica de Andrés Bello en Caracas*. p. 61.

Tabla XVII. **Temperatura en la ciudad de Tolima, Colombia del 1 al 12 de octubre de 2012**

Día	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	29,4	39	34,8
2	31	41,4	35,7
3	30	38	35
4	30	37	34
5	29	41	34,8
6	30	39	35
7	29,8	39,3	34,6
8	30	37	34,1
9	28	37	33,1
10	28,2	36,3	33
11	26	32	28,9
12	25	31	28

Fuente: RHODES, Mateo. *Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de honda, Tolima (Colombia)*. p.44.

Tabla XVIII. **Temperatura en la ciudad de Colima, México del 1 al 31 de octubre de 2008**

Día	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	33	20	25,3
2	32	19	25,3
3	32,6	20,3	25,1
4	32,4	21	24,9
5	30,6	24	26,7
6	29,7	22	23,9
7	30,2	21	24,5
8	31,8	20	24
9	31,2	21	25,1
10	28,6	22	25,2
11	25,8	21	23,1
12	26	21	23,6
13	29,8	21	25,1
14	30,4	20	23,7
15	31	20	25,6
16	31,7	21	25,2
17	33,7	21	26,7
18	30,2	22	25,8
19	31	20	26,8
20	33,4	20	25,8
21	32	23	26,5
22	30,1	20	25,1
23	31	20	25
24	27,4	21	22,8
25	30,8	20	24,4
26	29	20	25,3
27	36,2	21,8	25,9
28	32	18	25,4
29	31,4	19	24,3
30	33	19,4	25,6
31	25,4	35,3	20,7

Fuente: <http://www.tutiempo.net/clima/Colima/10-2008/766580.html> Consultado: septiembre de

2016

Tabla XIX. **Temperatura en la ciudad de Guatemala, Guatemala del 1 al 9 de enero de 2009**

Día	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	13	22	16.7
2	11	25	16.7
3	12.6	27	18.1
4	14	28	19.8
5	14	28.6	19.2
6	12.4	26.2	18.3
7	12.8	27	18.7
8	12.4	27.5	19.8
9	14	24	18.5

Fuente: http://www.tutiempo.net/clima/Guatemala_Aeropuertola_Aurora/01-2009/786410.html.

Consultado: septiembre de 2016

Tabla XX. **Temperatura en la ciudad de Guatemala, Guatemala del 1 al 12 de octubre de 2012**

Día	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	19,4	25,6	16
2	18,5	24,8	16,2
3	18,9	24,2	16
4	19,8	24,4	16
5	19,7	25	15,4
6	20	25	17
7	19,8	25,4	16,2
8	19,2	25,8	16,4
9	19,1	24,6	16,4
10	19	24,8	15
11	18,7	23,4	15
12	20,1	25	17,4

Fuente: http://www.tutiempo.net/clima/Guatemala_Aeropuertola_Aurora/10-2012/786410.htm.

Consultado: septiembre de 2016

Tabla XXI. **Temperatura en la ciudad de Guatemala, Guatemala del 1 al 31 de octubre de 2008**

Día	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	18.9	24.6	16.2
2	19.2	26	15.2
3	19.5	23	17.6
4	19.1	24.5	17
5	19.2	24	16
6	19.8	25	17
7	20	25	17,6
8	18.6	25.4	16,5
9	18.6	23	16
10	18.9	24	14.4
11	20	25	16.8
12	20.2	24.2	16.4
13	19.7	32.4	15.8
14	19.8	25.2	15.4
15	20.1	25.6	15.4
16	18.3	25.4	17
17	17.3	20.6	15
18	17.3	21	15
19	18.2	22	16.8
20	19	23.6	16
21	19.3	23.6	16
22	19.3	25	16
23	19.7	25.5	16.2
24	19.4	25.6	16.2
25	18.9	23	16
26	19.6	26	16
27	19.5	25.6	16,2
28	17,6	24,5	15,4
29	16,6	20,4	13,6
30	15,6	21	12
31	16	21	13

Fuente: http://www.tutiempo.net/clima/Guatemala_Aeropuertola_Aurora/10-2008/786410.html.

Consultado: septiembre de 2016

Tabla XXII. **Temperatura dentro de la edificación sin techo verde en la ciudad de Caracas, Venezuela del 1 al 9 de enero de 2009**

Día	Temperatura promedio (°C)
1	24,3
2	23,2
3	25
4	26,8
5	29,2
6	28,3
7	25,3
8	22,8
9	22,1

Fuente: ACUÑA, Rubén; ESTEVEZ, Carlos. *Factibilidad, diseño e instalación de un techo verde en el edificio de postgrado de la Universidad Católica de Andrés Bello en Caracas.* p. 62.

Tabla XXIII. **Temperatura dentro de la edificación sin techo verde en la ciudad de Tolima, Colombia del 1 al 12 de octubre de 2012**

Día	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	30	38.5	34.63
2	31.4	40	35.53
3	30.4	37.3	34.4
4	31	36.6	33.97
5	29	40	34.77
6	31	38	34.67
7	30	40	34.53
8	31.5	37	34.08
9	28.8	37.5	33.27
10	29	36.3	33.08
11	27.2	32	29.9
12	26.2	31.5	28.25

Fuente: RHODES, Mateo. *Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de honda, Tolima (Colombia).* p. 44.

Tabla XXIV. **Temperatura dentro de la edificación sin techo verde en la ciudad de Colima, México del 1 al 31 de octubre de 2008**

Día	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	22.5	31,9	28,3
2	22.1	31,1	27,8
3	22.1	31,5	27,9
4	23.2	31,9	28,3
5	23.2	30,3	27,9
6	24	29,5	27,3
7	21.7	29,5	26,7
8	22.5	30,7	27,4
9	22.5	31,9	28,4
10	24.4	29,1	27,8
11	23.6	26	25,8
12	22.1	27,5	25,6
13	21.7	30,7	27
14	22.9	28,3	26,2
15	21	29,5	25,9
16	21.7	31,1	27,3
17	23.2	32,8	28,8
18	23.6	30,7	28,2
19	22.9	32,3	28,6
20	23.2	32,8	28,7
21	23.6	31,9	28,5
22	21.3	29,1	26,1
23	21.7	29,9	26,7
24	22.9	25,2	24,8
25	21	27,9	25,1
26	21.3	30,7	26,6
27	22.1	31,1	27,2
28	22.5	29,9	26,8
29	21,3	28,7	25,5
30	19,8	30,3	25,8
31	20,6	31,5	26,8

Fuente: HARO, Elba. *Comportamiento de dos tipos de cubierta vegetales como dispositivo de climatización, para climas cálido sub-húmedos.* p. 67.

Tabla XXV. **Temperatura dentro de la edificación con techo verde en la ciudad de Caracas, Venezuela del 1 al 9 de enero de 2009**

Día	Temperatura promedio (°C)
1	22,4
2	22,1
3	23,2
4	23,7
5	24,1
6	23,9
7	23,5
8	22,6
9	20,8

Fuente: ACUÑA, Rubén; ESTEVEZ, Carlos; *Factibilidad, diseño e instalación de un techo verde en el edificio de postgrado de la Universidad Católica de Andrés Bello en Caracas.* p. 89.

Tabla XXVI. **Temperatura dentro de la edificación con techo verde en la ciudad de Tolima, Colombia del 1 al 12 de octubre de 2012**

Día	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	38.3	33,92
2	39	34,92
3	37.4	33,67
4	36	33,3
5	38	34,05
6	37	34
7	37.6	34,08
8	36	33,33
9	36	32,58
10	36	21,73
11	31,8	29,7
12	30,9	27,98

Fuente: RHODES, Mateo. *Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de honda, Tolima (Colombia).* p. 44.

Tabla XXVII. Temperatura dentro de la edificación con techo verde en la ciudad de Colima, México del 1 al 31 de Octubre de 2008

Día	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)
1	29.1	32.8	23.2
2	28.5	31.9	22.9
3	28.6	32.3	22,9
4	29.1	32.3	24
5	28.7	30,7	24
6	28.1	29,9	24,8
7	27.5	29,9	22,5
8	28.2	31,5	23,2
9	29.1	32,8	23,2
10	28.6	29,9	25,2
11	26.6	26,7	24.4
12	26.3	28,3	22,9
13	27.7	31,1	22,5
14	26.9	29,1	23,6
15	26.5	29,9	21,7
16	28	31,5	22,5
17	29.5	33,2	23,6
18	29	31,1	24,4
19	29.4	33,2	23,6
20	29.5	33,2	24
21	29.3	32,8	24,4
22	27	29,9	22,1
23	27.5	30,3	22,5
24	25.7	26,3	23,6
25	25.9	28,7	21,7
26	27	25,6	22,1
27	28	31,9	22,9
28	27,7	30,3	23,6
29	26,3	29,5	22,1
30	26,7	31,1	20,6
31	27,7	32,8	21,7

Fuente: HARO, Elba. *Comportamiento de dos tipos de cubierta vegetales como dispositivo de climatización, para climas cálido sub-húmedos.* p. 78.

Tabla XXVIII. **Calculo de diferencia de temperaturas (ΔT_1) entre edificaciones sin techo verde y con techo verde**

Ciudad	Fecha	Temperatura promedio dentro de la edificación sin techo verde (°C)	Temperatura promedio dentro de la edificación con techo verde (°C)	Diferencia temperatura promedio entre edificaciones (ΔT_1 °C)
Colima, México	01/10/2008	28.3	23.2	5.1
	02/10/2008	27.8	22.9	4.9
	03/10/2008	27.9	22.9	5
	04/10/2008	28.3	24	4.3
	05/10/2008	27.9	24	3.9
	06/10/2008	27.3	24.8	2.5
	07/10/2008	26.7	22.5	4.2
	08/10/2008	27.4	23.2	4.2
	09/10/2008	28.4	23.2	5.2
	10/10/2008	27.8	25.2	2.6
	11/10/2008	25.8	24.4	1.4
	12/10/2008	25.6	22.9	2.7
	13/10/2008	27	22.5	4.5
	14/10/2008	26.2	23.6	2.6
	15/10/2008	25.9	21.7	4.2
	16/10/2008	27.3	22.5	4.8
	17/10/2008	28.8	23.6	5.2
	18/10/2008	28.2	24.4	3.8
	19/10/2008	28.6	23.6	5
	20/10/2008	28.7	24	4.7
	21/10/2008	28.5	24.4	4.1
	22/10/2008	26.1	22.1	4
	23/10/2008	26.7	22.5	4.2
	24/10/2008	24.8	23.6	1.2
	25/10/2008	25.1	21.7	3.4
	26/10/2008	26.6	22.1	4.5
	27/10/2008	27.2	22.9	4.3
	28/10/2008	26.8	23.6	3.2
	29/10/2008	25.5	22.1	3.4
	30/10/2008	25.8	20.6	5.2
	31/10/2008	26.8	21.7	5.1

Caracas, Venezuela	01/01/2009	24.3	22.4	1.9
	02/01/2009	23.2	22.1	1.1
	03/01/2009	25	23.2	1.8
	04/01/2009	26.8	23.7	3.1
	05/01/2009	29.2	24.1	5.1
	06/01/2009	28.3	23.9	4.4
	07/01/2009	25.3	23.5	1.8
	08/01/2009	22.8	22.6	0.2
	09/01/2009	22.1	20.8	1.3
Tolima, Colombia	01/10/2012	34.63	33.92	0.71
	02/10/2012	35.53	34.92	0.61
	03/10/2012	34.4	33.67	0.73
	04/10/2012	33.97	33.3	0.67
	05/10/2012	34.77	34.05	0.72
	06/10/2012	34.67	34	0.67
	07/10/2012	34.53	34.08	0.45
	08/10/2012	34.08	33.33	0.75
	09/10/2012	33.27	32.58	0.69
	10/10/2012	33.08	21.73	11.35
	11/10/2012	29.9	29.7	0.2
	12/10/2012	28.25	27.98	0.27

Fuente: elaboración propia.

Para el factor x_2 la altura en cada una de las ciudades donde se realizaron los estudios base será dado por: ciudad de Caracas, Venezuela a una altura de 1.043 metros sobre el nivel del mar (<http://venciclopedia.com/?title=Caracas>); ciudad de Tolima; Colombia a una altura de 1,107 metros sobre el nivel del mar (<http://www.colombia-sa.com/departamentos/tolima/tolima.html>); además Colima, México a una altura de 550 metros sobre el nivel de mar (<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM06colima/municipios/06002a.html>) y la ciudad de Guatemala a una altura de 1,592 metros sobre el nivel del mar (<http://cnaturales.cubaeduca.cu/medias/pdf/1517.pdf>)

Tabla XXIX. **Alturas de la ciudades del modelo estadístico**

Ciudad	Altura sobre el nivel del mar (mts)
Caracas, Venezuela	1 043
Tolima, Colombia	1 107
Colima, México	550
Ciudad de Guatemala, Guatemala	1 592

Fuente: elaboración propia.

6.2. Cálculo del modelo estadístico

La solución de mínimos cuadrados para la estimación de β , involucra encontrar \mathbf{b} por lo cual se minimiza SSE:

$$SSE = (y - Xb)'(y - Xb)$$

Este proceso de minimización requiere resolver para \mathbf{b} en la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{b}} (SSE) = \mathbf{0}$$

El resultado se reduce a la solución en \mathbf{b} en:

$$(X'X)\mathbf{b} = X'y$$

La naturaleza de la matriz de \mathbf{X} , aparte del elemento inicial, el renglón i -ésimo representa los valores de x que dan lugar a la respuesta de y_i . Al escribir:

$$A = X'X = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ki} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ki} & \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 \end{bmatrix}$$

y

$$g = X'y = \begin{bmatrix} g_0 = \sum_{i=1}^n y_i \\ g_1 = \sum_{i=1}^n x_{1i}y_i \\ \vdots \\ g_k = \sum_{i=1}^n x_{ki}y_i \end{bmatrix}$$

Tabla XXX. Datos para el modelo estadístico de temperaturas de ciudades y temperaturas de infraestructuras sin techo verde y con techo verde

n	Diferencia temperatura promedio dentro de la infraestructura $y = \Delta T_1$ (°C)	$X_1 = T$ (temperatura)	Altura de la ciudad $X_2 = a$ (mts)
1	5.1	20.7	550
2	1.3	22.3	1 043
3	1.2	22.8	550
4	1.4	23.1	550
5	2.7	23.6	550
6	2.6	23.7	550
7	2.5	23.9	550
8	4.2	24	550
9	3.4	24.3	550
10	3.4	24.4	550
11	4.2	24.5	550
12	4.3	24.9	550
13	4.2	25	550
14	5	25.1	550
15	5.2	25.1	550
16	4.5	25.1	550
17	4	25.1	550
18	2.6	25.2	550
19	4.8	25.2	550
20	5.1	25.3	550
21	4.9	25.3	550
22	4.5	25.3	550
23	3.2	25.4	550
24	4.2	25.6	550
25	5.2	25.6	550
26	3.8	25.8	550
27	4.7	25.8	550
28	4.3	25.9	550
29	4.1	26.5	550
30	0.2	26.5	1 043

31	3.9	26.7	550
32	5.2	26.7	550
33	5	26.8	550
34	0.27	28	1107
35	0.2	28.9	1107
36	1.9	31.2	1 043
37	1.1	31.8	1 043
38	1.8	32.2	1 043
39	3.1	32.4	1 043
40	5.1	32.5	1 043
41	4.4	32.7	1 043
42	11.35	33	1 107
43	0.69	33.1	1 107
44	1.8	33.2	1 043
45	0.67	34	1 107
46	0.75	34.1	1 107
47	0.45	34.6	1 107
48	0.71	34.8	1 107
49	0.72	34.8	1 107
50	0.73	35	1 107
51	0.67	35	1 107
52	0,61	35,7	1 107

Fuente: elaboración propia.

De los datos tabulados se obtiene $n = 52$ y

$$\sum_{i=1}^{52} y_i = 161.92$$

$$\sum_{i=1}^{52} x_{1i} = 1448.2$$

$$\sum_{i=1}^{52} x_{2i} = 39721$$

$$\sum_{i=1}^{52} y_i^2 = 727.61$$

$$\sum_{i=1}^{52} x_{1i}^2 = 41258.5$$

$$\sum_{i=1}^{52} x_{2i}^2 = 33873529$$

$$\sum_{i=1}^{52} x_{1i}y_i = 4344.155$$

$$\sum_{i=1}^{52} x_{2i}y_i = 109186.84$$

$$\sum_{i=1}^{52} x_{1i}x_{2i} = 1155343.4$$

Las ecuaciones de estimación de mínimos cuadrados $(\mathbf{X}'\mathbf{X})\mathbf{b} = \mathbf{X}'\mathbf{y}$, son:

$$\begin{bmatrix} 52 & 1448.2 & 39721 \\ 1448.2 & 41258.5 & 1155343.4 \\ 39721 & 1155343.4 & 33873529 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 161.92 \\ 4344.155 \\ 109186.84 \end{bmatrix}$$

Matriz inversa:

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 1.404900182 & -0.070840937 & 0.000768788 \\ -0.070840937 & 0.004111891 & -0.00005718 \\ 0.000768788 & -0.00005718 & 0.00000108 \end{bmatrix}$$

Mediante la relación $\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y}$ los coeficientes de regresión estimados son (utilizando software *Wolfram Mathematica*, para la solución del sistema de ecuaciones lineales de tres variables):

$$b_0 = 3.67897$$

$$b_1 = 0.149194$$

$$b_2 = -0.006179$$

La ecuación de la regresión es:

$$\hat{y} = 3.67897 + 0.149194X_1 - 0.006179X_2$$

6.3. Resultados

Para el modelo de regresión:

$$\hat{y} = 1.5297 + 0.2575X_1 - 0.000635X_2$$

Donde:

\hat{y} = Reducción de la temperatura dentro de la edificación (dado en °C)

X_1 = la temperatura promedio de la ciudad (°C)

X_2 = la altura promedio de la ciudad (metros)

Para la comprobación del modelo de regresión por medio de un intervalo de confianza para $\mu Y | x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0}$. Un intervalo de confianza del $(1 - \alpha)100\%$ para la respuesta media $\mu Y | x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0}$ es:

$$y_o - t_{\alpha/2} \sqrt{x'_o (X'X)^{-1} x_o} < Y | x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0} < y_o + t_{\alpha/2} \sqrt{x'_o (X'X)^{-1} x_o}$$

Donde $t_{\alpha/2}$ es un valor de la distribución t con $n - k - 1$ grados de libertad.

Con $n - k - 1$ grados de libertad para probar la hipótesis y determinar los intervalos de confianza de B_j se utiliza el cálculo estadístico:

$$t = \frac{b_j - \beta_{j0}}{\sqrt{c_{jj}}}$$

Y no se rechaza si:

$$-t_{\alpha/2} < t < t_{\alpha/2}$$

Donde $t_{\alpha/2}$ es un valor de la distribución t con $n - k - 1$ grados de libertad

Para aplicar esta prueba de hipótesis para la ecuación lineal $y = x\beta + \varepsilon$, una estimación insesgada de σ^2 está dada por el cuadro medio del error o cuadrado medio residual:

$$s^2 = \frac{SSE}{n - k - 1}$$

Donde:

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

La identidad de suma de cuadrados indica:

$$SST = SSR + SSE$$

Donde:

SST = suma total corregida de cuadrados de y

SSR = suma de cuadrados de regresión

SSE = suma de cuadrados de los errores alrededor de la regresión

Con:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \text{suma total de cuadrados}$$

Y

^ -

$$SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Hay k grados de libertad asociados con SSR y, como siempre, SST tiene n - 1 grados de libertad por lo tanto después de la resta, SSE tiene n - k - 1 grados de libertad. Así la estimación de σ^2 la da de nuevo la suma de cuadrados del error dividida entre sus grados de libertad.

Para el modelo de regresión lineal $y = XB + \varepsilon$ la suma de cuadrados del error se puede escribir:

$$SSE = SST - SSR$$

Donde

$$SST = S_{yy}$$

Y

$$SSR = \sum_{j=0}^k b_j g_j - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}$$

Estimando σ^2 , para la suma de cuadrados del error con n - k - 1 = 9 grados de libertad

$$SST = S_{yy} = 727.61 - \frac{(161.92)^2}{52} = 258.41$$

Y

$$SSR = \sum_{j=0}^2 b_j g_j - \frac{(\sum_{i=1}^{52} y_i)^2}{52}$$

$$SSR = (3.67897)(161.92) + (0.14919)(4344.15) + (-0.006179)(109186.84) - \frac{(161.92)^2}{52}$$

$$SSR = 64.94$$

Con tres grados de libertad. La estimación de σ^2 :

$$s^2 = \frac{258.41 - 64.94}{52} = 3.7205$$

$$s = 1.9288$$

Calculado s , se obtiene el intervalo de confianza para una respuesta media para los siguientes datos:

X_1 = la temperatura promedio de la ciudad (°C) = 16.30 (promedio de la temperatura en la ciudad de Guatemala)

X_2 = la altura promedio de la ciudad (metros) = 1550 (promedio de la altura en la ciudad de Guatemala)

Para:

$$x'_o (X'X)^{-1} x_o$$

Entonces:

$$[1, 16.30, 1550] \begin{bmatrix} 1.404900182 & -0.070840937 & 0.000768788 \\ -0.070840937 & 0.004111891 & -0.00005718 \\ 0.000768788 & -0.00005718 & 0.00000108 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 16.30 \\ 1550 \end{bmatrix}$$

Utilizando software *Wolfram Mathematica*, para la solución de matrices se obtiene que:

$$x'_o(X'X)^{-1}x_o = 2.27$$

Y para y_o :

$$y_o = 1.5297 + 0.2575(16.30) - 0.000635(1550) = 4.74$$

Dado $s = 1.9288$ y al utilizar la tabla para valores críticos de la distribución t , se tiene que $t_{0.025} = 2.262$ para nueve grados de libertad

Entonces para el intervalo de confianza dado por:

$$y_o - t_{\alpha/2} \sqrt{x'_o(X'X)^{-1}x_o} < Y|x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0} < y_o + t_{\alpha/2} \sqrt{x'_o(X'X)^{-1}x_o}$$

Se obtiene:

$$4.74 - (2.262)(1.9288) \sqrt{2.27} < y_o < 4.74 + (2.262)(1.9288) \sqrt{2.27}$$

Utilizando software *Wolfram Mathematica*, para la solución de operaciones algebraicas se obtiene que:

$$3.53 < y_0 < 5.94$$

Para la prueba de hipótesis se tomarán los datos siguientes:

Hipótesis: se reducirá la temperatura más de 3°C dentro de una edificación en la ciudad de Guatemala (H_1).

Hipótesis nula: la temperatura será igual o menor a 3°C (H_0)

Se selecciona un nivel de significancia 0.05 y 9 grados de libertad

$$H_0: \beta_2 \leq -3$$

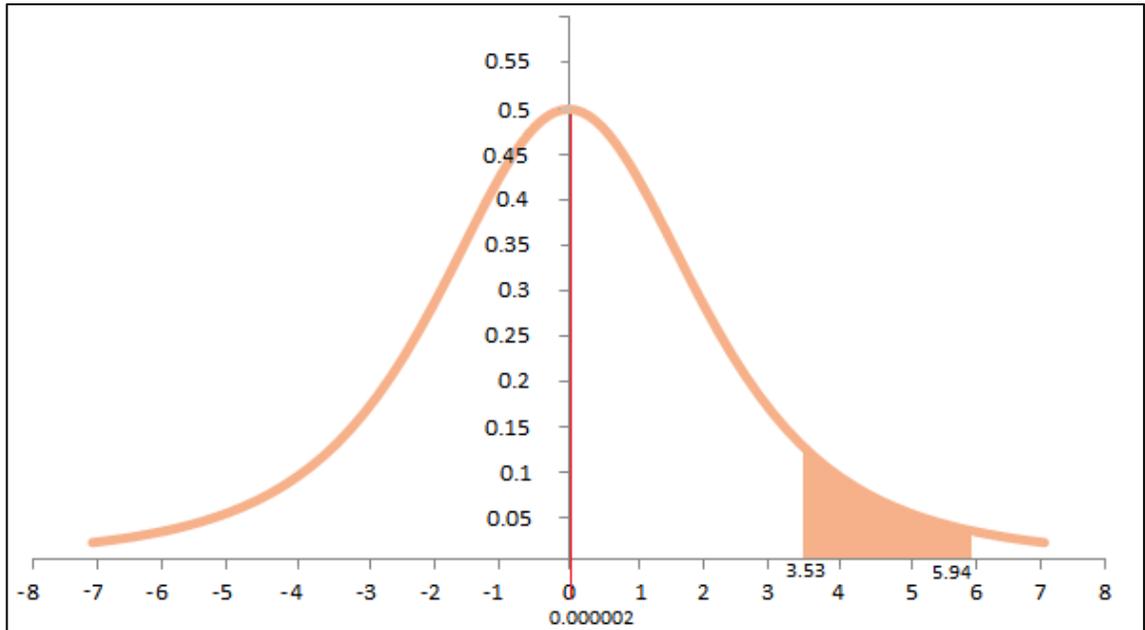
$$H_1: \beta_2 > -3$$

$$t = \frac{b_2 - \beta_{20}}{\sqrt{c_{22}}} = \frac{-0.006179 - (-5)}{1.9288 \sqrt{0.00000108}} = 6192.22$$

$$P = P(T > 6192.22) = 0.000002$$

Decisión: se rechaza H_0 , ya que la probabilidad de que H_0 se cumpla, queda fuera del intervalo de confianza $3.53 < y_0 < 5.94$ (ver Figura 22) y se concluye que $\beta_2 > -3$ (se reducirá la temperatura más de 3°C dentro de una edificación en la ciudad de Guatemala)

Figura 53. **Gráfica de intervalo de confianza y probabilidad para la prueba de hipótesis**



Fuente: elaboración propia, donde 0.000002 es la probabilidad de que la reducción de la temperatura sea menor de -3°C y el intervalo entre 3.53 y 5.94 es el intervalo de confianza para la prueba de hipótesis.

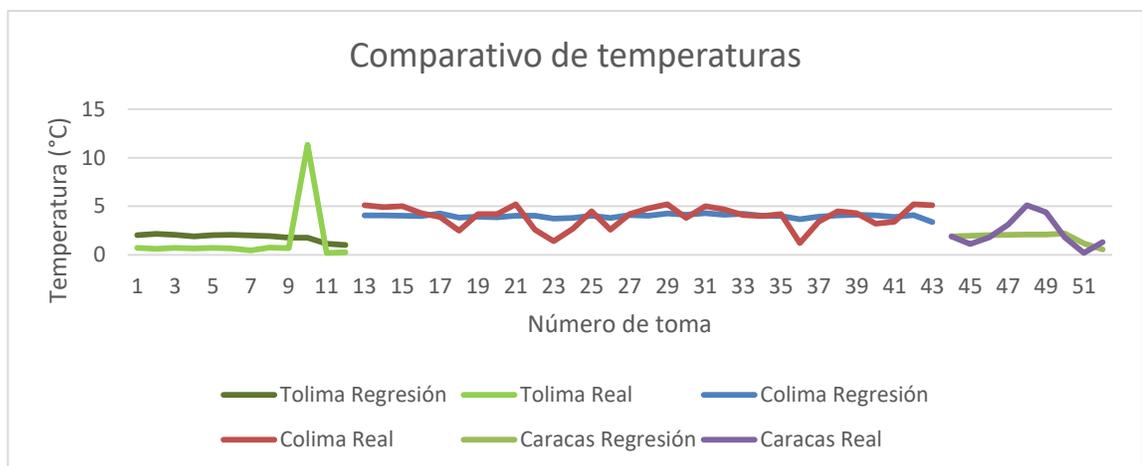
Tabla XXXI. Resultados para el modelo de regresión para las temperaturas y alturas tabuladas

Ciudad	Número de toma	Temperatura promedio (°C)	Altura promedio (mts)	Reducción de la temperatura dentro de la edificación (I°C)
Tolima, Colombia	1	34.8	1,107	2.03
	2	35.7	1,107	2.16
	3	35	1,107	2.06
	4	34	1,107	1.91
	5	34.8	1,107	2.03
	6	35	1,107	2.06
	7	34.6	1,107	2.00
	8	34.1	1,107	1.93
	9	33.1	1,107	1.78
	10	33	1,107	1.76
	11	28.9	1,107	1.15
	12	28	1,107	1.02
Colima, México	13	25.3	550	4.05
	14	25.3	550	4.05
	15	25.1	550	4.03
	16	24.9	550	4.00
	17	26.7	550	4.26
	18	23.9	550	3.85
	19	24.5	550	3.94
	20	24	550	3.86
	21	25.1	550	4.03
	22	25.2	550	4.04
	23	23.1	550	3.73
	24	23.6	550	3.80
	25	25.1	550	4.03
	26	23.7	550	3.82
	27	25.6	550	4.10
	28	25.2	550	4.04
	29	26.7	550	4.26
	30	25.8	550	4.13
	31	26.8	550	4.28
	32	25.8	550	4.13
	33	26.5	550	4.23
	34	25.1	550	4.03
	35	25	550	4.01

Caracas, Venezuela	36	22.8	550	3.68
	37	24.4	550	3.92
	38	25.3	550	4.05
	39	25.9	550	4.14
	40	25.4	550	4.07
	41	24.3	550	3.91
	42	25.6	550	4.10
	43	20.7	550	3.37
	44	31.2	1,043	1.89
	45	31.8	1,043	1.98
	46	32.2	1,043	2.04
	47	32.4	1,043	2.07
	48	32.5	1,043	2.08
	49	32.7	1,043	2.11
	50	33.2	1,043	2.19
	51	26.5	1,043	1.19
	52	22.3	1,043	0.56

Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Gráfico de comparación de temperaturas real - regresión**



Fuente: elaboración propia.

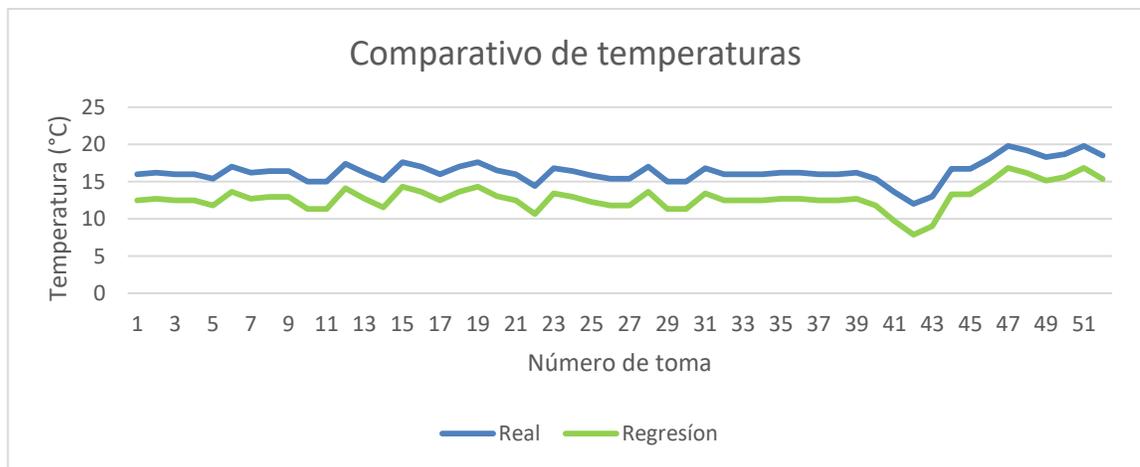
Tabla XXXII. Resultados para el modelo de regresión para las temperaturas y altura de la ciudad de Guatemala

Ciudad	Temperatura promedio (°C)	Altura promedio (mts)	Reducción de la temperatura dentro de la edificación (°C)
Ciudad de Guatemala, Guatemala	16	1550	4.20
	16.2	1550	4.15
	16	1550	4.20
	16	1550	4.20
	15.4	1550	4.35
	17	1550	3.94
	16.2	1550	4.15
	16.4	1550	4.10
	16.4	1550	4.10
	15	1550	4.46
	15	1550	4.46
	17.4	1550	3.84
	16.2	1550	4.15
	15.2	1550	4.41
	17.6	1550	3.79
	17	1550	3.94
	16	1550	4.20
	17	1550	3.94
	17.6	1550	3.79
	16.5	1550	4.07
	16	1550	4.20
	14.4	1550	4.61
	16.8	1550	3.99
	16.4	1550	4.10
	15.8	1550	4.25
	15.4	1550	4.35
	15.4	1550	4.35
	17	1550	3.94
	15	1550	4.46
	15	1550	4.46
16.8	1550	3.99	
16	1550	4.20	
16	1550	4.20	
16	1550	4.20	
16.2	1550	4.15	

16.2	1550	4.15
16	1550	4.20
16	1550	4.20
16.2	1550	4.15
15.4	1550	4.35
13.6	1550	4.82
12	1550	5.23
13	1550	4.97
16.7	1550	4.02
16.7	1550	4.02
18.1	1550	3.66
19.8	1550	3.22
19.2	1550	3.38
18.3	1550	3.61
18.7	1550	3.50
19.8	1550	3.22
18.5	1550	3.56

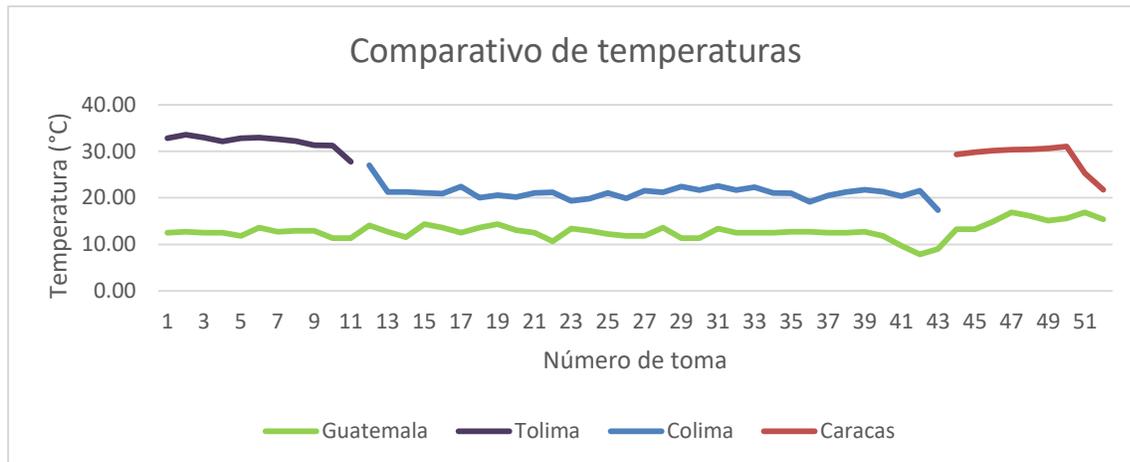
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Gráfico de comparación de temperatura real – temperatura obtenida por medio del modelo de regresión para la reducción de temperatura al instalar un techo verde**



Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Gráfico de comparación de datos reales con datos obtenidos por medio del modelo de regresión respecto de la reducción de la temperatura dentro de la edificación**



Fuente: elaboración propia.

6.4. **Discusión de resultados**

Para los datos obtenidos en el método estadístico de regresión lineal se obtiene una reducción de la temperatura en relación a la temperatura promedio de la ciudad y la altura promedio de la ciudad de Guatemala.

En el punto 4.2, cálculo del modelo estadístico, se obtuvieron los resultados para cada una de las variables a evaluar (temperatura y altura), el cual se logró comprobar por medio de una prueba de hipótesis con un intervalo de confianza. Los resultados fueron satisfactorios para una prueba de hipótesis que la temperatura se reducirá más de 3°C dentro de una edificación.

En la figura 23, en el gráfico de comparación de temperaturas real – regresión, se pueden observar las temperaturas reales de las edificaciones que cuentan con techos verdes en las diferentes ciudades donde se obtuvieron los resultados reales y los datos obtenidos por medio del modelo estadístico donde

se puede apreciar la suavización de la línea de tendencia respecto de la temperatura y altura.

En la figura 25, en el gráfico de comparación de temperaturas real – regresión, se pueden observar las temperaturas reales de las edificaciones que cuentan con techos verdes en las diferentes ciudades donde se obtuvieron los resultados reales y los datos obtenidos por medio del modelo estadístico para la ciudad de Guatemala, lo cual por la altura la variación, es notable.

7. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

Para el análisis de factibilidad se considerará, como en la descripción del diseño del techo verde en el capítulo 5, un techo verde extensivo, sobre una cubierta o techo de una edificación ya instalada, donde la temperatura interna pueda llegar a 28°C, Lo anterior tomado en cuenta “una edificación con el tamaño promedio de las viviendas en Guatemala, que es de 152 mts^{2.50} Se tomará como línea base los 152 mts²; los costos se proyectarán por metro cuadrado, exceptuando aquellos elementos o instalaciones que conlleven un costo o gasto que no se pueda proyectar individualmente.

7.1. Costos de instalación de un techo verde

A continuación se desglosan los costos de instalación de un techo verde.

7.1.1. Costos de preinstalación

Los costos de preinstalación se consideraran un costo único, previo a la instalación del techo verde. Los costos estarán dados por metro cuadrado (m²).

Tabla XXXIII. **Costos de preinstalación del techo verde por m²**

Rubro	Costo por metro cuadrado (m ²)
Mantenimiento preventivo del techo	Q. 20.00
Mantenimiento preventivo del desagüe	Q. 8.00

Fuente: elaboración propia, costos obtenidos del promedio del mercado guatemalteco hasta mayo de 2016

⁵⁰ LARIOS, José; ROBALINO, Juan. *Medición de la calidad de vida en la ciudad de Guatemala y su importancia en el diseño de una política pública municipal.* p. 9.

Se considerará un gasto único en mantenimiento correctivo del techo y desagüe por Q. 2 500.00.

7.1.2. Costo de instalación del techo verde

Se consideran los elementos por instalar en cada una de las capas que conforman el techo verde, el costo estará dado por m².

Tabla XXXIV. Costos de materiales básicos del techo verde por m²

Rubro	Costo por metro cuadrado (m ²)
Espuma de polietileno laminada en aluminio	Q 33,57
Membrana impermeable prefabricada de asfalto modificado con polímero APP	Q. 71,50
Drenaje nodular de polietileno	Q 34,50
Capa filtrante <i>MacDrain</i>	Q 60,90
Capa de sustrato	Q. 25,00
Capa vegetal	Q 30,00

Fuente: elaboración propia, costos obtenidos del promedio del mercado guatemalteco hasta mayo 2016

Se considerará un gasto por instalación en factores de accesorios para instalación por un total de Q. 3 500,00.

Por ser un trabajo de construcción básica se considerará un tiempo de instalación de quince días para dos personas con un Salario mínimo de Q. 2 747,04. (Ministerio de Trabajo y Previsión Social, Guatemala, salario mínimo)

7.2. Costo de mantenimiento del techo verde

Por lo considerado en el punto 5.2, por ser un tipo de techo extensivo su mantenimiento se limita a tres a cuatro visitas anuales, por lo cual se considera un costo de mantenimiento de Q. 2 500 anuales (Q 1,52 por metro cuadrado mensuales en mantenimiento), esto sin contar con imprevistos de filtraciones en la estructura portante, en sistema de desagüe, deterioro de las capas que constituyen el techo verde que requieran un mantenimiento correctivo y que signifiquen un gasto adicional.

7.3. Costos de oportunidad al no instalar un techo verde

Al no contar con un techo verde en una edificación, se tienen costos que se pueden reducir o eliminar aprovechando las ventajas que conlleva la instalación de un techo verde.

7.3.1. Costos de mantenimiento del techo de la edificación

Se debe considerar los gastos de mantenimiento preventivo y correctivo del techo de la edificación, el cual aumenta su frecuencia a la hora de no contar con un techo verde.

Estos costos serán considerados para mantenimientos anuales.

Tabla XXXV. **Costos de mantenimiento de un techo por m²**

Rubro	Costo por metro cuadrado (m²)
Mantenimiento preventivo del techo	Q 20,00
Mantenimiento preventivo del desagüe	Q 8,00

Fuente: elaboración propia, costos obtenidos del promedio del mercado guatemalteco hasta mayo 2016

Para este caso igualmente se considera un gasto en mantenimiento correctivo del techo y desagüe por Q. 2 500,00, este será para cada cinco años, sin contar imprevistos en el techo o el sistema de desagüe que requieran gastos adicionales. Se considera un costo de accesorios por Q. 2 500, la mano de obra ya está incluida en el costo de instalación.

7.3.2. Costos de consumo eléctrico por elementos de aire acondicionado

Para este punto se considera la instalación de un sistema de aire acondicionado adecuado a los metros cuadrados de la edificación y para la reducción de una temperatura ambiente de 3°C durante 8 horas en el día.

Para el área por acondicionar se seleccionará la instalación de dos aires acondicionados modelo mini Split de pared:

Nombre: MINI SPLIT DE PARED
 Capacidad: 22.000BTU R410 230V/1PH/60HZ
 Marca: ECOX
 Modelo: INVERTER EDCM022C15B

Figura 57. **Imagen del aire acondicionado seleccionado**



Fuente: http://www.gtanuncios.com/media/gt/1292701_1292800/1292710_b_e7088e51004ec2c74d5ff296fbb74af3.jpg. Consultado: septiembre de 2016.

Tabla XXXVI. **Costos de consumo mensual (por unidad)**

Rubro	Costo mensual
Mantenimiento preventivo	Q. 500
Mantenimiento correctivo	Q. 120
Consumo eléctrico	Q. 7 559, 04

Fuente: elaboración propia, costos obtenidos del promedio del mercado guatemalteco hasta mayo de 2016.

Se considerará un costo único de instalación del equipo por Q. 28 991.87, ya que se necesitarán dos unidades; estos costos no incluirán imprevistos en el sistema de aire acondicionado gastos adicionales.

7.4. Análisis costo – beneficio

Al aplicar la técnica relación beneficio / costo da como resultado un coeficiente que permite medir cuánto representan los beneficios de un proyecto en relación a su costo.

Esta relación se obtiene de dividir la suma de todos los ingresos traídos a valor presente entre la suma de todos los costos también actualizados a una tasa de descuento, la cual puede ser el costo del capital de los inversionistas.

La fórmula de esta técnica es la siguiente:

$$B/C = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{li}{(1+r)^i}}{\sum_{i=0}^n \frac{Ci}{(1+r)^i}}$$

Donde:

r (%) = Costo de oportunidad del capital

n = Máximo valor que alcanza el periodo de vida útil

i = Periodo de vida útil del proyecto

l = Ingresos del proyecto

C = Costo del proyecto (incluye inversión inicial)

El índice que se obtendrá de esta relación se puede interpretar de la siguiente manera: si es mayor a 1, la relación favorecerá al beneficio, ya que el costo será menor; si es menor a 1 la relación favorecerá al costo ya que el beneficio será menor.

Entonces:

Para realizar la relación beneficio costo, se tomarán todos los costos y gastos de la instalación de un techo verde como el costo en la relación y los costos y gastos de instalación de un sistema de aire acondicionado como el beneficio (ahorro que se obtendrá a la hora de instalar un techo verde).

r (%) = 4.09% de inflación (SIB, promedio ponderado económico)

n = 10 años máximo valor que alcanza el período de vida útil para ambos casos

i = 10 años de vida útil para ambos casos

I = Se determinaran como ingresos del proyecto los costos de implementación de un sistema de aire acondicionado

C = Se determinaran como costos del proyecto los costos de implementación de un techo verde

Para los costos de instalación del techo verde en una edificación de 152 mts² se tendrá:

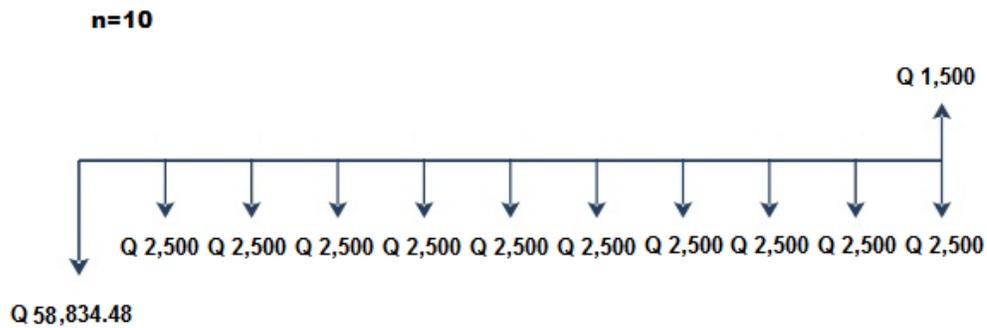
Tabla XXXVII. **Costos de instalación de techo verde (152 mt²)**

Rubro	Costo mensual
Costo de preinstalación (mantenimiento correctivo y preventivo, tabla XXIII) Q28x152mts2	Q. 4 256.00
Mantenimiento correctivo	Q. 2 500
Materiales (Tabla XXIV) Q225.47x152mts ²	Q. 38 831.44
Accesorios	Q. 3 500
Mano de obra	Q 2 747,04
Total	Q 51 834,48

Fuente: elaboración propia, costos obtenidos del promedio del mercado guatemalteco hasta mayo de 2016.

El costo de mantenimiento será de un total de Q. 2 500,00 anuales para los 152 mts². Se considerará un tiempo de vida de diez años y una recuperación de Q. 1 500,00 en materiales del techo verde.

Figura 58. **Grafica flujo de gastos para la implementación del techo verde**



Fuente: elaboración propia.

$$VPN = I_o + \sum_{i=1}^n \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$VPN = -58,834.48 - 2500 \frac{(1.0409)^{10} - 1}{0.0409(1.0409)^{10}} + 1500 \frac{1}{(1.0409)^{10}}$$

$$VPN_{costos} = -78016.60$$

Para los costos de instalación de un sistema de aire acondicionado considerado para la misma infraestructura, se tomará como ventaja la relación costo – beneficio (costo de oportunidad), para los cuales se tendrá:

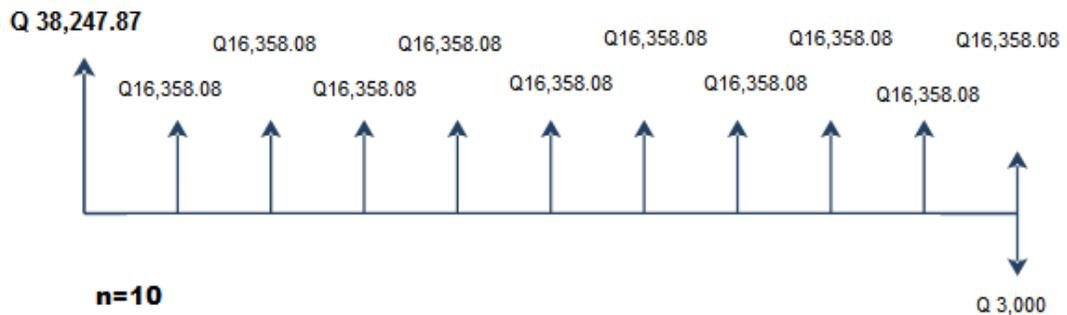
Tabla XXXVIII. **Costos de instalación de sistema de aire acondicionado (152 mt²)**

Rubro	Costo mensual
Costo de preinstalación (mantenimiento correctivo y preventivo, tabla XXV) Q28x152mts ²	Q. 4 256,00
Mantenimiento correctivo	Q. 2 500,00
Costo de instalación	Q. 28 991,87
Accesorios	Q. 2 500,00
Total	Q. 38 247,87

Fuente: elaboración propia, costos obtenidos del promedio del mercado guatemalteco hasta mayo de 2016.

Los gastos anuales por mantenimiento (tabla XVI), total de Q. 16 358.08 mensuales y un valor de recuperación después de 10 años de vida útil por Q. 3 000.00

Figura 59. **Gráfica flujo de gastos para la implementación sistema de aire acondicionado**



Fuente: elaboración propia.

$$VPN = I_o + \sum_{i=1}^n \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$VPN = 38247.87 + 15358.08 \frac{(1.0409)^{10} - 1}{0.0409(1.0409)^{10}} - 3000 \frac{1}{(1.0409)^{10}}$$

$$VPN_{Ingresos} = 164269.03$$

$$\frac{B}{C} = \frac{164269.03}{78016.60} = 2.10$$

Dicha relación indica que el proyecto es beneficioso, puesto que la relación es mayor que uno (el beneficio o costo de instalación del sistema de aire acondicionado es mayor al costo de instalación de un techo verde o costo).

CONCLUSIONES

1. Las ventajas de la implementación de techos verdes en edificaciones comunes en Guatemala, desde el punto de vista económico y financiero es factible. Sus costos de mantenimiento y beneficios de ahorro energético permiten que sea rentable. Los beneficios ambientales en la implementación del techo verde son la reducción de la temperatura interna de la edificación y el ahorro energético en aire acondicionado. Además, se presentan otros beneficios que son inherentes al techo verde, como el beneficio ecológico, el cambio del ambiente visual y la resiliencia a los ecosistemas locales que se han perdido conforme se avanza el crecimiento de las ciudades. Las desventajas de la implementación de un techo verde son su alto costo de inversión y las restricciones técnicas que los techos deben contar para su instalación.
2. Los elementos que conforman un techo verde, son las ocho capas. Cada una cuenta con una función específica para el mantenimiento de la estructura portante y el sistema de desalajo del agua, que en estas dos se considera una sola capa. Aislamiento térmico para no permitir la transferencia de calor hacia adentro y mantener el calor interno. Membrana antiraíz impermeabilizante, que no permitirá que el agua se filtre a la estructura portante y aislará las raíces en las capas superiores. Capa drenante, que mantendrá el agua necesaria para alimentar el sustrato y drenará la saturación del agua en el sustrato. Capa de sustrato, que contendrá los elementos que permitirán el desarrollo de la capa vegetal. Capa vegetal, que se constituye por las diferentes especies de plantas por utilizar.

3. Los requerimientos técnicos mínimos para la implementación de un techo verde son: una estructura de losa portante que soporte una carga de 110 kg/m²; que la estructura cuente con un sistema de desagüe integrado y aislante térmico de espuma de polietileno laminada en aluminio; membrana anti-raíz impermeabilizante de asfalto modificado con polímero APP; capa drenante de drenaje nodular de polietileno; capa filtrante de geosintético MacDrain; capa de sustrato con mezcla de materiales vegetales con arena blanca, estopa de coco, aserrín de pino, *peat moss* y tierra negra, capa vegetal con especies propias del área con raíces cortas que no requieran mucho espacio.

4. Las áreas en donde se pueden instalar los techos verdes deben ser estructuras de losa fundida, las cuales pueden variar desde extensiones pequeñas de 1mts x 1mts hasta extensiones de losa en edificios completos, siempre y cuando cumplan con las especificaciones técnicas para que puedan soportar la estructura que componen las capas del techo verde. Para los prototipos de techo verde se asignan áreas seguras y de acceso restringido para la integridad del prototipo y los instrumentos sugeridos para la obtención de datos, estas áreas han sido elegidas por ser propiedades de la Universidad de San Carlos de Guatemala y cuentan con diferentes localidades a distintas altitudes y longitudes dentro del territorio de Guatemala, que permiten la obtención de datos en diferentes climas.

5. Los elementos que permiten el mantenimiento de los techos verdes, no difieren de los instrumentos utilizados en la jardinería. Cada capa está diseñada con elementos resistentes y adecuados para que su mantenimiento individual sea nulo. Los elementos que requieren supervisión y mantenimiento constante son los sistemas de desagüe que

pueden taparse por la producción del desecho vegetal que se produce en los cambios de estaciones en cada año.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el uso de este documento como apoyo de referencia para la implementación de un proyecto de construcción e instalación de prototipos de techos verdes.
2. Realizar un análisis experimental de los comportamientos de los ambientes dentro de las edificaciones con techos verdes, a través de la implementación de prototipos de techos verdes, para obtener datos en ambientes controlados y así determinar sus beneficios en edificaciones en Guatemala. Se puede tomar como base el trabajo titulado *Propuesta de prototipos de techos verdes* de la Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Escuela de Mecánica Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
3. Efectuar estudios previos a la instalación de un techo verde. Actualmente, existen empresas que se dedican a la instalación de techos verdes pero no cuentan con estudios dentro de la ciudad de Guatemala, que permitan la garantía de que el techo verde tendrá una esperanza de vida útil más allá de los cinco años por los tipos de materiales que utilizan, los cuales, han sido copias de techos instalados en otros países.
4. Ejecutar estudios posteriores en combinación con otras tecnologías sustentables, como purificadores naturales de agua, captadores de energía solar o aeólica, para fines domésticos o industriales.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACUÑA, Rubén; ESTÉVEZ, Carlos. *Factibilidad, diseño e instalación de un techo verde en el edificio de postgrado de la Universidad Católica de Andrés Bello en Caracas*. Caracas, Venezuela, 2013. 136 p.
2. AGUDELO, Paola; KYUNG, Mirian; HURTADO, María Juliana. *Techos verdes: menos gris, más verde; Creación y Producción en Diseño y Comunicación N°58*. Facultad de Diseño y Comunicación - Universidad de Palermo. Buenos Aires, Argentina, 2013. 21 p.
3. AMBIENTUM. *Sistemas de riego*. recuperado de: http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/Sistemas_de_riego.asp. 2012. Consultado: septiembre de 2016.
4. BERMÚDEZ, Estefanía. *Techos verdes para rescatar la ciudad, Bogotá Colombia*. Recuperado de: <http://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/techos-verdes-rescatar-ciudad-articulo-522911>. 2014. Consultado: julio de 2016.
5. BISCIA, Reynaldo. *Que es un techo verde: Beneficios de un techo verde. Techos verdes*. Recuperado de: http://www.techosverdes.com.ar/que_es_un_techo_verde.html. 2005. Consultado: julio de 2016.
6. CRISTANCHO, N. *Techos verdes en Bogotá, una alternativa ambiental con beneficios técnicos*. Tesis de pregrado. Universidad la Gran Colombia, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá. 2011. 186 p.

7. ECOTELHADO. *Ley de techos verdes en Bogotá – Colombia*. Recuperado de: <http://ecotelhado.com.co/ley-techos-verdes-bogota-colombia/>. 2014. Consultado: julio de 2016.
8. EL TIEMPO. *Bogotá ya tiene su primer edificio público con techo verde*. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-8813064>. 2011. Consultado: julio 2016.
9. ELY, Óscar. *Terrazas verdes, sostenibilidad para todos*. Recuperado de: <http://www.trcimplan.gob.mx/blog/terrazas-verdes-sostenibilidad-para-todos.html>. 2016. Consultado: agosto de 2016.
10. HARO, Elba. *Comportamiento de dos tipos de cubierta vegetales como dispositivo de climatización, para climas cálido sub-húmedos*. Universidad de Colima. Colima, México, 2009. 161 p.
11. IARNA. *Estado actual del clima y calidad del aire en Guatemala*. Instituto de investigación y proyección sobre ambiente natural y sociedad. Universidad Rafael Landívar. Guatemala, Guatemala, 2004. 230 p.
12. IBAÑEZ, Ricardo. *Techos vivos extensivos: una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia*. revista Arlarife, revista 1, 2008. 32 p.
13. KOBERLE, Alex. *Energizar a Guatemala: propuesta de plan de electricidad sostenible, International Rivers*. El observador. Guatemala, Guatemala, 2012. 90 p.

14. LARIOS, José; Robalino, Juan. *Medición de la calidad de vida en la ciudad de Guatemala y su importancia en el diseño de una política pública municipal*. Banco Interamericano de Desarrollo. Guatemala, Guatemala, 2014. 28 p.
15. LEE, Hye Min (2013) *History of green roofs the urban heat island effect*. Macaulay Honors College. New York, EEUU, 2013. Recuperado de: <https://macaulay.cuny.edu/eportfolios/macbride13/research/history-of-green-roofs-the-urban-heat-island-effect/>. Consultado: julio de 2016.
16. LÓPEZ, Carlos. *Un acercamiento a las cubiertas verdes*. Editorial F.B.P S.A., Medellín Colombia, 2010. 108 p.
17. MAYORGA, Andrea. *Aplicación arquitectónica de los geosintéticos en Guatemala (arquitectura paisajista, techos verdes y estabilización de suelos)*. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 205 p.
18. MINKE, Gernot. *Techos verdes: planificación, ejecución, consejos prácticos*. Editorial Fin de Siglo. Montevideo Uruguay, 2004. 85 p.
19. MARTÍNEZ, E.; MORENO, P.; REYNA, A. *Azoteas verdes: la naturaleza más cerca del cielo*, Eco-Xela. obtenido de <https://ecoxela.wordpress.com/2010/07/15/azoteas-verdes-la-naturaleza-mas-cerca-del-cielo/>. Consultado: julio de 2016.

20. OGLESBY, Robert; ROWE, Clinton. *Informe Final Impactos climáticos para Guatemala: Resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5*. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Guatemala, 2011. 40 p.
21. PÉREZ, Monserrat. *La azotea verde más grande de Latinoamérica está en México*. Recuperado de: <https://www.veoverde.com/2013/11/la-azotea-verde-mas-grande-de-latinoamerica-esta-en-mexico/>. 2013. Consultado: septiembre de 2016
22. PECK, Steven; CALLAHAN, Chris; KUHN, Monica; and BASS. *Greenbacks from Green roofs: Forging a New Industry in Canada*, CMHC. Toronto, Canada, 1999. 29 p.
23. QUIÑÓNEZ, Mario. *Uso de la fibra de coco como sustrato en la producción de pascua (Euphorbia pulcherrima; WILD.EX KLOTSCCH) para exportación; agroindustrias JOVISA, San Miguel Dueñas, Sacatepéquez (2007-2010) estudio de caso*. Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Agrícolas con énfasis en cultivos tropicales. Guatemala, 2014. 66 p.
24. RHODES, Mateo. *Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de honda, Tolima (Colombia)*. Pontificia Universidad Javeriana Facultad de Estudios Ambientales y rurales carrera de ecología. Colombia, 2012. 88 p.
25. ROSALES, Mario. *Centro de trabajos para ciegos, Palín Escuintla*. Facultad de Arquitectura de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 152 p.

26. RUDOLF, Wolfgang & RUDOLF, Franz. *Necesidad de maduración de grandes áreas edificadas. Agricultura: Revista Agropecuaria.* 749, 1035–1038. Obtenido de http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Agri/Agri_1994_749_1035_1038.pdf. Consultado: septiembre de 2016.
27. SAILOR, D. J., *A green roof model for building energy simulations programs, Department of Mechanical and Materials Engineering.* Portland State University, Portland, OR, EEUU, 2008. 140 p.
28. SÁNCHEZ, Irais. *Manual para el diseño e instalación de una azotea verde.* trabajo de graduación Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. 107 p.
29. SÁNCHEZ, Tonatiuh. *Evaluación de la tecnología de techos verdes como agentes ahorradores de energía en México.* Universidad Nacional Autónoma de México, 2011. 36 p.
30. SANTOS, Ana Lucía. *La sinfonía de los sordos: el problema del ruido en la Ciudad de Guatemala.* Escuela de Ciencia Política. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 152 p.
31. Servicio de Jardines UGR. *Estudio técnico de techos verdes.* Universidad de Granada, España, 2015. 11 p.

32. SCHALLENBER, Julieta; PIERNAVIEJA, Gonzalo; HERNÁNDEZ, Carlos; UNAMUNZAGA, Pedro; GARCÍA, Ramón; DÍAZ, Mercedes; CABRERA, Delia; MARTEL, Gilberto; PARDILLA, Javier; SUBIELA, Vicente. *Energías renovables y eficiencia energética*. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., Canarias, España, 2004. 148 p.
33. TOBAR, Manuel. *Prototipos de techos verdes*. Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, de la Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 32 p.
34. URBANO-LÓPEZ DE MENESES, B. *Sistema comparativo de áreas urbanas naturadas*. In J. Briz (Ed.). Seminarios del Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro y Canarias. Madrid, España: Editorial Agrícola Española, 1999. 236 p.
35. WALPOLE Ronald; MYERS Raymond. *Probabilidad y Estadística 4ª Edición*. McGraw-Hill / Interamericana de México S.A de C.V., 1992. 754 p.
36. WERTHMANN, Christian. (2007) *Green Roof a case study*. Princeton Architectural Press, New York, EEUU, 2007. 160 p.
37. WILSON, Geoff (2009) *Eleven countries are now members of World Green Roof Infrastructure Network*. Recuperado de: <http://www.worldgreenroof.org/files/pdf/WGRIN-RELEASE-March-13-2009.pdf>. Consultado: julio de 2016.