



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
División Académica de Ciencias Biológicas



**“RELACIÓN COSTO BENEFICIO DE LA INSTALACIÓN DE UN
TECHO ECOLÓGICO EN ZONAS URBANAS Y BAJO
CONDICIONES DE TRÓPICO HÚMEDO”**

Trabajo recepcional, en la modalidad de:

Tesis

Para obtener el título en:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Miguel Ángel Jesús Castañeda

Director:

Dr. José Roberto Hernández Barajas

Villahermosa, Tabasco, México

Abril, 2019

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Relación Costo Beneficio De La Instalación De Un Techo Ecológico En Zonas Urbanas Y Bajo Condiciones De Trópico Húmedo

Por Nallely Alonso Ramos

CANTIDAD DE PALABRAS 10757

HORA DE ENTREGA

01-JUL-2025 01:40P. M.

NÚMERO DE
IDENTIFICACIÓN DEL
TRABAJO

117018512

Relación Costo Beneficio De La Instalación De Un Techo Ecológico En Zonas Urbanas Y Bajo Condiciones De Trópico Húmedo

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	docplayer.es Internet	199 palabras — 2%
2	azm.ojs.inecol.mx Internet	198 palabras — 2%
3	colposdigital.colpos.mx:8080 Internet	196 palabras — 2%
4	www.scielo.org.mx Internet	106 palabras — 1%
5	www.coursehero.com Internet	83 palabras — 1%
6	www.aacademica.org Internet	69 palabras — 1%
7	www.socmexent.org Internet	65 palabras — 1%
8	hdl.handle.net Internet	61 palabras — 1%
9	revistas.ujat.mx Internet	58 palabras — 1%
10	sinat.semarnat.gob.mx Internet	56 palabras — 1%

11	es.wikipedia.org Internet	41 palabras — 1%
12	ia903206.us.archive.org Internet	41 palabras — 1%
13	repositorio.ug.edu.ec Internet	38 palabras — < 1%
14	www.conabio.gob.mx Internet	33 palabras — < 1%
15	vdocuments.net Internet	30 palabras — < 1%
16	archive.org Internet	26 palabras — < 1%
17	iksadyayinevi.com Internet	25 palabras — < 1%
18	repositorio.umsa.bo Internet	21 palabras — < 1%
19	www.powtoon.com Internet	21 palabras — < 1%
20	congresotabasco.gob.mx Internet	20 palabras — < 1%
21	www.thefreelibrary.com Internet	20 palabras — < 1%
22	www.researchgate.net Internet	19 palabras — < 1%
23	www.etabasco.gob.mx Internet	16 palabras — < 1%

24	repositorio.unemi.edu.ec Internet	15 palabras — < 1%
25	pdfslide.tips Internet	12 palabras — < 1%
26	riaa.uaem.mx Internet	12 palabras — < 1%
27	www.scribd.com Internet	12 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 12 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCION

MARZO 26 DE 2019

**C. MIGUEL ÁNGEL JESÚS CASTAÑEDA
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **“RELACIÓN COSTO BENEFICIO DE LA INSTALACIÓN DE UN TECHO ECOLÓGICO EN ZONAS URBANAS Y BAJO CONDICIONES DE TRÓPICO HÚMEDO”**, asesorado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas y sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por la Dra. Carolina Zequeira Larios, M. en C. Eduardo Javier Moguel Ordoñez, Dr. José Roberto Hernández Barajas, MISA. Elizabeth Magaña Villegas y M. en C. Francisco Javier Alarcón de la Torre.

**ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**M. EN C. ROSA MARTHA PADRON LOPEZ
DIRECTORA**

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.



CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis denominado: **“RELACIÓN COSTO BENEFICIO DE LA INSTALACIÓN DE UN TECHO ECOLÓGICO EN ZONAS URBANAS Y BAJO CONDICIONES DE TRÓPICO HÚMEDO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 26 de Marzo de 2019

AUTORIZO



MIGUEL ÁNGEL JESÚS CASTAÑEDA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial a mi Director de Tesis el Dr. José Roberto Hernández Barajas a quien manifiesto mi mayor gratitud por su valiosa dirección y apoyo incondicional durante el desarrollo y culminación de este trabajo, así como la confianza, la paciencia y por compartir sus conocimientos para conmigo. Mi admiración para usted.

A mi comité revisor integrado por la Dra. Carolina Zequeira Larios, M. en C. Eduardo Javier Moguel Ordoñez, M. en C. Elizabeth Magaña Villegas y M. en C. Francisco Javier Alarcón de la Torre a quienes expreso mi reconocimiento por haberme dedicado el tiempo necesario y total disposición, brindándome sus importantes observaciones, conocimientos, experiencias y consejos para enriquecer este trabajo.

A mi esposa MIPA Araceli G. Pérez Gómez, por el apoyo incondicional que siempre me ha brindado, especialmente en el desarrollo de mis estudios profesionales, agradezco mucho tus contribuciones y sugerencias profesionales hacia este trabajo.

DEDICATORIA

Este logro lo dedico a mi familia. A mi esposa, que poco es agradecer tu extraordinario apoyo y optimismo para conmigo en todos los ámbitos, amor incondicional que es recíproco, este logro lo comparto contigo. A mi hijo, sol de mi vida, que fortalece mi camino hacia la superación y el éxito. Estos esfuerzos y metas son pensados en ustedes. Los amo.

A mis padres y hermana que desde siempre han sido mi motor alimentado por tanto amor, sacrificios y esfuerzos que me ha impulsado a seguir adelante, gracias a ustedes nunca me faltó nada, espero algún día darles un poco de todo lo que se merecen. Con todo mi corazón, admiración y orgullo, su hijo.

A mis abuelos paternos y abuela materna, que desempeñaron conmigo siempre una labor de segundos padres, cuidándome, aconsejándome, apoyándome laboral y académicamente, este trabajo es también gracias a esa formación enriquecida de valores que obtuve de ustedes, los quiero mucho.

A mis suegros, por abrir su corazón y acogerme desde que tuve la dicha de conocerlos, por las palabras de aliento llenas de experiencias, sabiduría y su apoyo incondicional. Este trabajo es también gracias a ustedes, con mucho afecto.

CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Justificación	5
1.2. Objetivo general	6
1.3. Objetivos específicos	6
2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL	7
2.1. Tipos de techos verdes	7
2.2. Beneficios de un techo ecológico	8
2.3. Elementos que constituyen un techo verde	9
2.4. El ciclo de vida	12
2.5. Análisis beneficio-costos	12
2.6. Antecedentes particulares	13
2.7. Definiciones de las funciones de distribución de probabilidad	16
2.7.1. Distribución uniforme	17
2.7.2. Distribución normal o gaussiana	18
2.7.3. Distribución beta	20
3. MÉTODOS	22
3.1. Delimitación del ciclo de vida	22
3.2. Recopilación de la información de costos	23
3.3. Características de la edificación y su consumo energético	24
3.4. Interfaz gráfica de usuario empleando Visual Basic para Aplicaciones	28
3.4.1. Declaración de variables	29
3.4.2. Programación de la interfaz	29
3.5. Análisis de costos	30
3.6. Aspectos de la simulación estocástica	30
3.6.1. Generación aleatoria de costos	31
3.6.2. Criterios establecidos para la simulación de los escenarios	33
3.7. Relación beneficio-costos del ciclo de vida del techo verde	35
3.7.1. Costos	36

3.7.2.	Beneficios negativos	38
3.7.3.	Beneficios positivos	39
3.7.4.	Relación convencional B/C	40
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1.	Recopilación de costos unitarios	41
4.2.	Análisis estadístico de costos unitarios recopilados	45
4.3.	Descripción de la interfaz gráfica de usuario	46
4.4.	Simulaciones estocásticas	47
4.5.	Costos de mano de obra directa de la instalación del techo verde	51
4.6.	Costos de los insumos de la instalación del techo verde	53
4.7.	El ahorro energético como el principal beneficio del techo verde	55
4.8.	Otros beneficios del techo verde	57
4.8.1.	Impuesto predial	57
4.8.2.	Captura de carbono	59
4.9.	Relación beneficio-costo del techo verde	62
5.	CONCLUSIONES	69
6.	REFERENCIAS	71
	ANEXO A	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de techos verdes y sus principales atributos. _____	8
Tabla 2. Valores de los parámetros de entrada. Fuente: (Ulubeyli & Arslan, 2017) _____	15
Tabla 3. Áreas de construcción de la edificación, Fuente: (Fuentes Velasco, 2014) _____	24
Tabla 4. Materiales de construcción para los elementos estructural/arquitectónicos de la edificación <i>Tipo A</i> . Fuente: (Fuentes Velasco, 2014) _____	25
Tabla 5. Consumo eléctrico de los equipos empleados en la edificación residencial (Fuentes Velasco, 2014) _____	26
Tabla 6. Costos por kWh según la tarifa 1D. Fuente (CFE, 2018). _____	28
Tabla 7. Costo de mano de obra por etapas y de la membrana drenante para reemplazo cada 10 años. _____	37
Tabla 8. Costo de mano de obra por desmantelamiento del techo verde extensivo. _____	38
Tabla 9. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Curacreto S. A de C. V. _____	41
Tabla 10. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Sika Mexicana S. A de C. V. _____	42
Tabla 11. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Imperquimia S. A de C.V. _____	42
Tabla 12. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Fester S. A de C. V. _____	43
Tabla 13. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Delta S. A de C. 43	
Tabla 14. Análisis de los costos de mano de obra por proyecto. Fuente: Elaboración propia. 44	
Tabla 15. Análisis de los costos de mano de obra por m ² . Fuente: Elaboración propia. _____	45
Tabla 16. Proporción de los costos de mano de obra directa en relación al Subtotal de Mano de Obra. _____	52
Tabla 17. Proporción de los costos de mano de obra directa con relación al costo total de instalación. _____	52
Tabla 18. Media y desviación estándar de los costos de mano de obra directa de la instalación del techo verde extensivo. _____	53
Tabla 19. Proporción de los costos de los insumos en relación al subtotal de insumos. _____	53
Tabla 20. Proporción de los costos de insumos en relación al costo total de instalación. _____	54
Tabla 21. Media y desviación estándar de los costos de la instalación del techo verde extensivo. _____	54
Tabla 22. Cálculo del costo por consumo eléctrico anual en edificación <i>Tipo A5 C.R.</i> _____	55
Tabla 23. Cálculo del costo por consumo eléctrico anual en edificación <i>Tipo A5 G.R.</i> _____	56
Tabla 24. Costo anual y ahorro económico con techo convencional y techo verde de la edificación. _____	56
Tabla 25. Potencial de almacenamiento de C y CO ₂ del techo verde extensivo (Getter, <i>et al.</i> , 2009). _____	60
Tabla 26. Potencial de almacenamiento de C y CO ₂ del techo verde extensivo bajo estudio. _____	60

Tabla 27. VPN de los beneficios positivos del ciclo de vida de un techo verde extensivo (\$/MXN).	62
Tabla 28. Valor presente del beneficio negativo y los costos del ciclo de vida de un techo verde extensivo.	62
Tabla 29. Relación beneficio-costos del proyecto considerando dos escenarios.	64
Tabla 30. Estudios previos centrados en techos verdes extensivos con beneficios privados. Fuente: (Ulubeyli & Arslan, 2017)	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área bajo la curva de la función de densidad de probabilidad gaussiana, $Pa \leq x \leq b$.	17
Figura 2. Representación gráfica de la distribución normal estándar.	20
Figura 3. Alcance del costo del ciclo de vida con relación al análisis de ciclo de vida de un techo verde extensivo (Adaptado de Bolívar-Fuentes, 2015).	22
Figura 4. Clasificación de costos relacionados al ciclo de vida de un techo verde extensivo para las cuatro etapas principales. I: Instalación, M: Mantenimiento, R: Reemplazo, D: Desmantelamiento y disposición final de residuos.	31
Figura 5. Funciones de la distribución beta de los materiales impermeabilizantes.	46
Figura 6. Distribuciones de probabilidad del costo total de instalación de un techo verde extensivo para varios escenarios de simulación.	48
Figura 7. Variabilidad de la relación B/C con los costos de las actividades de mantenimiento con distintas frecuencias al año en el escenario 4. Cada par de datos alrededor de cada punto corresponde a la frecuencia de mantenimiento y a la relación B/C, respectivamente.	65
Figura 8. Variabilidad de la relación B/C con los costos de las actividades de mantenimiento con distintas frecuencias al año en el escenario 5. Cada par de datos alrededor de cada punto corresponde a la frecuencia de mantenimiento y a la relación B/C, respectivamente.	66

RESUMEN

En esta investigación se estimó el costo de un techo verde de tipo extensivo sobre edificaciones urbanas en regiones de clima tropical húmedo considerando las etapas del análisis de ciclo de vida: *i)* instalación, *ii)* mantenimiento y reemplazo, *iii)* desmantelamiento y disposición final de los residuos, determinando la relación Beneficio-Costo asociando a estos los beneficios ambientales, como el ahorro energético, un descuento en el impuesto predial y un bono por la captura de carbono en un periodo de 40 años. Se realizó un análisis de los costos directos e indirectos, fijos y variables, para cada etapa del ciclo de vida para una edificación con un área de 63 m².

El análisis de costos se elaboró en *Microsoft Excel* para facilitar su integración con el método de simulación estocástica tipo Monte Carlo. La etapa de instalación del techo verde contiene la mayor parte de los costos unitarios con incertidumbre, por lo que éstos fueron representados como funciones de probabilidad uniforme, normal gaussiana y beta. Las etapas restantes fueron representadas como un modelo determinístico. El desarrollo de una herramienta de cómputo creada con *Visual Basic para Aplicaciones* (VBA) de Microsoft Excel, facilitó la integración de los costos con el método de simulación estocástica Monte Carlo. Se realizaron seis escenarios de simulación del costo total de instalación. Se determinó la relación B/C del proyecto durante su tiempo de vida útil con la propuesta de los costos de instalación del escenario más probable y un peor escenario, considerando la variabilidad en los costos de mantenimiento y su frecuencia anual.

Los resultados de este estudio determinan que un techo verde extensivo a lo largo de su vida útil en el escenario más probable puede ser económicamente viable si el propio ocupante de la residencia es el responsable de su mantenimiento, pues esta actividad genera el mayor costo del proyecto. Asimismo, se obtiene también una relación B/C rentable si se contrata a un jardinero para el mantenimiento solamente tres veces al año, con honorarios entre \$ 300.00 MXN y \$ 350.00 MXN por jornada de trabajo. Igualmente, la relación B/C es viable considerando los costos de instalación del peor escenario, si, y solo si el propietario realiza las actividades de mantenimiento y/o si se costean las actividades de mantenimiento con una frecuencia de tres veces al año con un costo de jornal de \$ 300.00 MXN.

1. INTRODUCCIÓN

Más de la mitad de la población mundial se concentra en las ciudades y esta concentración da como resultado una serie de desafíos. El acelerado desarrollo urbano genera problemas, no sólo sociales y económicos, sino también ambientales, especialmente visibles en las ciudades de los países en vía de desarrollo, las cuales carecen generalmente de la infraestructura adecuada para mitigar los efectos de la expansión urbana desordenada, enfrentándose a la contaminación del aire, el efecto de la isla de calor y la capacidad insuficiente de los sistemas de alcantarillado durante las fuertes precipitaciones pluviales. Las emisiones de fuentes móviles, las infraestructuras urbanas como los estacionamientos y los techos convencionales contribuyen a elevar las temperaturas de la superficie urbana al reducir el albedo de una ciudad. El aumento de las temperaturas urbanas en combinación con las emisiones de las industrias influye en la calidad del aire local y regional (Clark, Adriaens, & Talbot, 2008).

Una respuesta a estas problemáticas ha sido proporcionada por la ciencia y las nuevas tecnologías; desde soluciones relativamente simples como el incremento de la cobertura de áreas verdes, hasta las tecnologías sostenibles relativamente nuevas como la energía solar, los materiales de construcción que reflejan la radiación solar, la reutilización del agua de lluvia y las técnicas empleadas para el almacenamiento de agua y energía. Entre estas tecnologías ecológicas recientes, están los techos verdes que nacieron como respuesta a la dificultad de expansión de áreas destinadas a la vegetación en los núcleos urbanos. Los techos verdes, conocidos también como techos ecológicos, cubiertas verdes, sistemas de naturación y azoteas verdes, son una nueva forma de incorporación de masa vegetal a la vida urbana, en aquellos espacios que han sido poco valorados (Zielinski, García Collante, & Vega Paternina, 2012).

La adopción de techos verdes es una tendencia creciente desde los años sesenta. Después de ganar popularidad en Europa, la mayor parte del mundo está familiarizado con esta infraestructura verde como parte del diseño sostenible de un edificio (Semaan & Pearce, 2016). Las plantas pueden reducir el calor por medio de la reflexión de la radiación solar y la generación de sombra actuando como aislante del edificio mejorando la temperatura dentro del mismo. De esta manera, y entre otros beneficios asociados a la instalación de un techo verde, han logrado reconocerse como una tecnología moderna y ecológica para enfrentar el cambio climático y los problemas ambientales más comunes en el medio urbano (Jim & Tsang, 2011).

Aunque un techo verde puede tener costos iniciales más altos que la mayoría de los techos convencionales, un análisis completo del ciclo de vida puede identificar cómo el techo beneficia al dueño del edificio. En muchos casos, estos beneficios justifican el costo de los techos verdes en zonas densamente pobladas. Además, el propietario de un edificio puede beneficiarse directamente de la reducción del uso de energía eléctrica y el aumento de la vida útil del techo. Por último, la adopción generalizada de techos verdes puede proporcionar beneficios netos indirectos significativos para la comunidad (US Environmental Protection Agency, 2014).

A pesar de los grandes beneficios que ofrecen los techos verdes al ambiente, a los edificios y al propietario, el riesgo de que estos sistemas ecológicos no cumplan con su función puede ser alto. Por lo tanto, es importante tener en cuenta los principios legales y factores locales (climáticos, culturales) previos a la instalación del mismo, ya que, tanto el costo como su implementación varía de un techo a otro.

1.1. Justificación

Como resultado del crecimiento económico, muchos países están experimentando una mayor urbanización. Debido a esto, la nueva infraestructura urbana se hace a expensas de las áreas verdes, lo que conlleva a generar problemáticas ambientales, como el efecto de la isla de calor, contaminación del aire y la insuficiente capacidad del sistema de alcantarillado pluvial durante las fuertes temporadas de lluvia.

Muchos de los beneficios ambientales que ofrecen los techos verdes son numerosos y algunos de ellos están bien investigados. Sin embargo, existen pocos estudios sobre la rentabilidad de la instalación de los mismos, así como sobre la relación entre los costos del ciclo de vida y los beneficios ambientales. La mayor parte de esos estudios fueron desarrollados en países septentrionales, con condiciones climatológicas y meteorológicas diferentes a las del trópico húmedo. Por lo anterior, en esta investigación se aspira a estimar el costo de la instalación de un techo verde de tipo extensivo sobre viviendas o edificios urbanos en regiones de clima tropical húmedo, determinando la relación costo-beneficio considerando algunos de los beneficios ambientales, tales como el ahorro energético asociado, la reducción de impuestos y tarifas, la captura de carbono (en forma de CO₂) y la captación pluvial.

1.2. Objetivo general

Estimar la relación beneficio-costos del ciclo de vida de un techo ecológico de tipo extensivo en edificaciones de zonas urbanas bajo condiciones de un clima tropical húmedo, a partir de una simulación estocástica.

1.3. Objetivos específicos

- Realizar un análisis de costos unitarios más importantes relacionados a la instalación de un techo verde extensivo.
- Diseñar una herramienta de cómputo que permita simplificar el empleo de las simulaciones estocásticas de los costos totales de la instalación de un techo verde extensivo.
- Aplicar un modelo estocástico de cuantificación de costos para estimar la función de probabilidad del costo total de instalación de un techo verde.
- Determinar la relación beneficio-costos del empleo de un techo verde extensivo en comparación a los beneficios asociados a éste.

2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

2.1. Tipos de techos verdes

Los techos verdes generalmente se clasifican como extensivos o intensivos (Berardi *et al.*, 2014). Los techos verdes extensivos se caracterizan por los costos mínimos de construcción y mantenimiento, el peso y la profundidad de la capa de suelo. Las construcciones típicas de este tipo de techo generalmente no se riegan y la vegetación consiste en especies autóctonas y nativas de plantas que están bien adaptadas a las condiciones climáticas locales. Este tipo de techo verde se conoce a veces como un eco-techo y tiene la menor eficiencia en comparación con las otras categorías, con respecto al rendimiento energético de un edificio o vivienda. Puede aplicarse en su mayoría a cualquier tipo de techo existente, tanto a techos planos como inclinados, ya que la carga adicional total es relativamente pequeña.

Por su parte, los techos verdes intensivos son la categoría más exigente de tales construcciones. El tipo de vegetación utilizada es similar a la vegetación plantada en jardines a nivel del suelo, incluso incluyendo árboles pequeños. Las capas del suelo son lo suficientemente gruesas como para soportar este tipo de vegetación, que requiere riego y mantenimiento regular. Este tipo de techo verde se refiere a menudo como un jardín de la azotea y, dependiendo del peso total de las capas adicionales del suelo, se puede aplicar sólo a los edificios que pueden soportar el peso adicional. Es el tipo de techo verde más costoso respecto a construcción y mantenimiento, pero proporciona un área adicional para los usuarios del edificio durante todo el año. (Theodosiou, 2009)

A continuación, se muestra en la **Tabla 1** una clasificación sobre los principales criterios de comparación entre techos verdes extensivos y techos verdes intensivos de acuerdo con Berardi *et al.* (2014).

Tabla 1. Clasificación de techos verdes y sus principales atributos.

Principales Atributos	Techo Verde Extensivo	Techo Verde Intensivo
Profundidad del sustrato	< 200 mm	> 200 mm
Accesibilidad	Inaccesible (Raíces frágiles)	Accesible, puede usarse para fines recreativos
Peso	60–150 kg/m ²	>300 kg/m ² , puede requerir una estructura reforzada
Diversidad de la flora	Baja, tan sólo césped y herbáceas	Alta, por ejemplo, césped, plantas perennes, arbustos y árboles
Construcción	Moderadamente fácil	Compleja
Irrigación	Eventualmente, no necesario	Necesidad de un drenaje y un sistema de riego
Mantenimiento	Sencillo	Complicado
Costo	Bajo	Alto

2.2. Beneficios de un techo ecológico

Diversos autores mencionan los beneficios de un techo verde, dentro de los cuales se incluyen:

- Mitigación del efecto de la isla de calor: Al reducir la transferencia de calor a través del techo del edificio, puede mejorar la comodidad interior y reducir el estrés térmico asociado con las olas de calor (Santamouris, 2014).
- La reducción del consumo de energía eléctrica: Los techos verdes absorben el calor y actúan como aisladores de los edificios, reduciendo la energía necesaria para proporcionar refrigeración y calefacción (Fuentes Velasco, 2014).
- Reducción de la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero: La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos considera que, al reducir la demanda de aire acondicionado, los techos verdes pueden disminuir la producción de contaminación del aire asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero. La vegetación también puede eliminar los contaminantes del aire y las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la deposición seca y la captura de carbono (US Environmental Protection Agency, 2016).

- Mejora del manejo de las aguas pluviales y calidad del agua: Los techos verdes pueden reducir y disminuir el escurrimiento de aguas pluviales en el ambiente urbano; También filtran los contaminantes de la precipitación pluvial (US Environmental Protection Agency, 2016).
- Los techos verdes aumentan las capacidades insulares de los techos y restablecen el equilibrio hídrico entre la evapotranspiración y la escorrentía (Clark, Adriaens, & Talbot, 2008)
- Mejor calidad de vida: Los techos verdes pueden proporcionar un valor estético (US Environmental Protection Agency, 2016), en algunos casos y dependiendo del tipo de techo, la formación de zonas recreativas (Oberndorfer *et al.*, 2007); y el aumento del hábitat y la biodiversidad (Carter & Rasmussen, 2006); además de aumentar el valor de la propiedad (Jim & Peng, 2012).

2.3. Elementos que constituyen un techo verde

Los techos verdes comprenden varios componentes que están diseñados estructuralmente para recrear las condiciones naturales de los sustratos del suelo, esto permite albergar y sostener distintos tipos de vegetación. Los componentes están acoplados entre sí, de tal forma que garantizan un funcionamiento seguro, además de cumplir con las expectativas de vida útil a largo plazo. Las características de los componentes pueden variar según las exigencias del tipo de azotea verde. A continuación, se muestran los componentes:

Vegetación

Las plantas constituyen la capa superficial de todo el sistema de un techo verde. Cabe señalar que es importante el uso de individuos herbáceos, arbustivos o arbóreos que sean nativos de la región, debido a que las condiciones climáticas que deben soportar estas, como las condiciones de sequía o disponibilidad del agua, exposición solar, entre otras, son factores limitantes para su adaptación y crecimiento.

Las especies utilizadas como cobertura vegetal en un techo verde extensivo son generalmente de ciclo vegetativo perenne. Deben ser de condición regenerativa y sobrevivir a condiciones ambientales estresantes, cumpliendo con la capacidad de reproducción vegetativa rápida (Bolívar Fuentes, 2015).

Sustrato de crecimiento

La elección de un buen sustrato de crecimiento y sus componentes garantizan un crecimiento adecuado para el tipo de vegetación que se desee plantar. Muchos beneficios de los techos verdes están directamente asociados con las propiedades del sustrato de crecimiento, incluida la mejora de la calidad del agua, retención de aguas pluviales, los beneficios térmicos y el aislamiento acústico. Además, los valores de pH, nutrientes, porosidad y permeabilidad deben ser adecuados para el crecimiento de las plantas. Asimismo, el espesor de la capa de sustrato influye directamente con el rendimiento de los techos verdes ya que éste determinará también el crecimiento de la vegetación, así como la carga estructural asignada al techo.

Membrana filtrante

La función principal de una membrana filtrante es evitar que las partículas pequeñas como los restos de plantas, raíces y los finos del suelo entren y obstruyan la capa de drenaje, además de tener un control del flujo de agua y así mantener el sustrato de crecimiento húmedo para el crecimiento de la vegetación.

Membrana drenante

Es una membrana nodular cuya función es drenar el exceso de agua pluvial y de riego en sus cavidades convexas y así evitar la saturación de agua en el sustrato de crecimiento, además de garantizar una adecuada oxigenación del sustrato y de las raíces de las plantas. De lo contrario, cuando lo requiere, almacena el agua de riego en temporadas de sequía para mantener húmedo el sustrato de crecimiento.

Dicho lo anterior, la membrana drenante proporciona un equilibrio recomendable entre el aire y el agua en el sistema de techos verdes y convenientemente alarga la vida del concreto, debido a que evita el contacto directo del sustrato de crecimiento y del agua con el mismo impidiendo así, cualquier humedad en la losa.

Membrana impermeable y membrana anti-raíz

La membrana impermeable es un requisito fundamental para cualquier instalación de techo verde. Debido al alto contenido de humedad del sustrato de crecimiento y a la membrana drenante, su instalación es recomendable. En el mercado pueden encontrarse varios tipos de membranas impermeables con diferentes características y materiales dependiendo de la naturaleza de la impermeabilización, incluyendo las membranas prefabricadas SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) diseñadas principalmente para muros y techos verdes, de base asfáltica complementadas con una membrana de refuerzo o aditivo químico anti raíz que protege la infraestructura del techo de las raíces de las plantas que podrían penetrar las membranas superficiales del techo verde. Sin embargo, la membrana anti-raíz puede ser opcional para techos verdes de tipo extensivo y obligatoria para techos verdes tipo intensivo.

2.4. El ciclo de vida

El ciclo de vida es el conjunto de etapas consecutivas e interrelacionadas de un proyecto o un sistema de producción, desde la adquisición de materias primas o la generación de los recursos naturales hasta la disposición final de materiales.

Un análisis de ciclo de vida (LCA, acrónimo en inglés de Life Cycle Assessment) es una técnica para evaluar los aspectos e impactos ambientales potenciales asociados a la elaboración de un producto, obra o proyecto (ISO 14040, 2006). Las tres etapas básicas de un análisis de ciclo de vida son la elaboración de un inventario de las entradas y salidas directas, e incluso indirectas del sistema de producción; la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados con las entradas y salidas; y la interpretación de los resultados del análisis de inventario y fases de evaluación de impacto en relación con los objetivos del estudio. (Guinée, 2002).

El costo del ciclo de vida (LCC) y la evaluación del ciclo de vida (LCA) miden el costo y el desempeño ambiental de edificios completos, sistemas y/o componentes y materiales de construcción. Aunque las evaluaciones tienen diferentes dimensiones, ambas son importantes en el proceso de toma de decisiones para el diseño de un proyecto o la selección de licitaciones. Se han llevado a cabo intentos para desarrollar enfoques de evaluación que se adapten tanto a los costos como a los elementos ambientales.

2.5. Análisis beneficio-costo

El análisis económico ha desarrollado un instrumento útil para evaluar proyectos de inversión, de forma que puede servir de guía en las decisiones para canalizar los recursos hacia aquellos proyectos que proporcionen un mayor beneficio. Este instrumento es el análisis Beneficio-Costo (Aguaza, 2012).

El análisis Beneficio-Costo es una metodología para evaluar de forma exhaustiva los costos y beneficios de un proyecto (programa, intervención o medida de política), con el objetivo de determinar si este es rentable y, si lo es, en qué medida. Para ello, los costos y beneficios deben ser cuantificados, y expresados en unidades monetarias, con el fin de poder calcular los beneficios netos del proyecto. Esta metodología muestra además que se gana y que se pierde (y por cuánto) como resultado de la ejecución del proyecto.

2.6. Antecedentes particulares

Mahdiyar *et al.*, (2016) realizaron un estudio probabilístico de costo-beneficio de dos tipos de techos verdes en Kuala Lumpur, haciendo énfasis en todos los factores privados que afectan esta relación. Los costos de instalación, operación y mantenimiento se compararon con los beneficios como el ahorro de energía eléctrica, el aumento del valor de la propiedad y el efecto acústico para determinar el valor presente neto y el período de recuperación de la instalación de los techos verdes mediante la simulación de Monte Carlo. Dos escenarios son los que consideraron en los análisis: el uso de la propiedad, y la venta de la propiedad después de la construcción, además de haber realizado un análisis de correlación y sensibilidad de regresión.

En su estudio, Mahdiyar y colaboradores determinaron que la instalación de un techo verde extensivo es una inversión con un retorno a corto plazo donde los propietarios se benefician de éste, con una baja probabilidad de pérdida. Para el techo verde intensivo, el período de recuperación es más largo que el techo verde extensivo; sin embargo, también puede ser considerado como una inversión a corto plazo. El periodo de amortización de ambos tipos de techos verdes es de dos años y la vida útil de la cubierta verde es de 50 años, por lo que ambos tipos de techos verdes pueden considerarse como una alternativa viable a los techos convencionales.

Clark, Adriaens, & Talbot (2008), por medio de un estudio en la Universidad de Michigan, compararon los costos de un techo convencional y la instalación de un techo verde extensivo con un área aproximada de 2,000 m² con todos sus beneficios, como el manejo de aguas pluviales y la salud pública gracias a la absorción de óxidos de nitrógeno (NO_x). Asimismo, determinaron el tiempo requerido para el retorno de la inversión de la instalación mediante un análisis de valor presente neto. La instalación del techo verde costaría alrededor de \$ 464,000 USD frente a \$ 335,000 USD para un techo convencional en el año del 2006. Sin embargo, a lo largo de los 40 años de vida, el techo verde ahorraría cerca de \$ 200,000 USD casi dos tercios de estos ahorros provendrían de la reducción de las necesidades de energía para el edificio.

De acuerdo con Velázquez (2014), el costo de instalación de un techo verde depende de muchas variables, inclusive para dos azoteas de la misma dimensión puede ser muy diferente. Sin embargo, menciona que la cifra oscila entre \$ 1,200 MXN y \$ 3,500 MXN/m². Aunque finalmente todo dependerá de los factores que intervienen en la instalación, el propósito y tipo de azotea verde que se requiera. Asimismo, William *et al.*, (2016) determinaron que los costos de instalación del techo verde varían considerablemente, dependiendo de la estructura del techo, los tipos de plantas y el drenaje existente. Estos oscilan alrededor de \$ 215 USD/m² para techos verdes extensivos y \$ 323 USD/m² para techos verdes intensivos con un costo anual de mantenimiento de \$ 8 USD/m².

Peck & Kuhn (2001) encontraron que los costos de los techos verdes varían dependiendo de los componentes, como el medio de cultivo, el tipo de membrana para techos, el sistema de drenaje, el uso de cercas o barandas, el tipo y la cantidad de plantas. Un informe de 2001 estimaba que los costos de instalación fueron de \$ 110 USD/m² para techos extensivos y \$ 270 USD/m² para techos intensivos. Los costos en Alemania, donde los techos verdes son más frecuentes, oscilan entre \$ 86 USD y \$ 162 USD/m² (Scholz-Barth, 2001).

Haciendo énfasis en los techos verdes extensivos, Ulubeyli & Arslan (2017) estimaron los valores financieros de costos y beneficios considerando tres posibles escenarios desde la perspectiva económica de Turquía que se presenta en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Valores de los parámetros de entrada. Fuente: (Ulubeyli & Arslan, 2017)

Parámetros	Unidades	Escenarios		
		El Mejor	Lo Más Probable	Lo Peor
Costos de las plantas y la vegetación	USD / m ²	9.35	9.56	9.68
Costos del medio de cultivo	USD / m ²	7.70	9.35	11
Costos de la capa de filtro permeable a las raíces	USD / m ²	0.72	1.46	2.20
Costos de drenaje y capilaridad	USD / m ²	5.50	11.55	17.60
Costo de la capa de protección	USD / m ²	1.87	6.44	11
Costo de la capa de almacenamiento	USD / m ²	1.32	4.62	7.92
Costo del impermeabilizante	USD / m ²	12.83	14.48	16.13
Costos del nivelador de hormigón	USD / m ²	2.66	3.00	3.33
Alquiler de la grúa	Día / año	7	9	11
Mantenimiento	Día / año	4	5	6
Ahorro energético	kWh / año	130.4	84.65	38.9
Aislamiento Acústico	\$/ m ²	18.33	16.33	13.83
Aumento del valor de la propiedad	%	5.00	3.50	2.00
Tasa de interés compuesta	% / año	11.50	10.00	9.00

La implementación de los techos verdes es una manera prometedora para mejorar la densidad de vegetación en las ciudades. Tomando como ejemplo Alemania, los techos verdes cubren una superficie media de 1.4×10^6 m² (1.5 m² per cápita) en las ciudades de Múnich, Karlsruhe y Stuttgart, siendo esto más del 90% de techos verdes extensivos sin necesidad de riego (Heusinger & Weber, 2017).

Xiao, Lin, Han, & Zhang (2014) mencionan que, a partir de 2011, la ciudad de Beijing, China, ha construido una zona de techo verde con un área de 1, 500,000 m². Asimismo, reporta que, a finales de 2012, el área de techos verdes en la ciudad de Shanghái ha alcanzado los 1, 450,000 m². Además, en la ciudad de Chengdu, China, se ha construido un área de más de 3, 000, 000 m² alcanzando 1 m² per cápita.

Asimismo, un estudio de la Universidad de Chapingo al año 2008, menciona que en la ciudad de México existían aproximadamente de 10, 000 a 11,000 m² de techos verdes; en la Ciudad de México está el 90% de ellas, seguido por Guadalajara y Monterrey. El

proyecto de Azoteas Verdes llegó a México en 1999; comenzó en el Instituto de Biología de la UNAM, mediante un convenio con la Comisión de Recursos Naturales del Gobierno de la Ciudad de México (CORENA) como una medida urgente para mitigar los altos índices de contaminación atmosférica en la Ciudad de México (Velázquez, 2014).

2.7. Definiciones de las funciones de distribución de probabilidad

Una variable aleatoria continua es una función, usualmente numérica, que puede tomar un número infinito de valores en un intervalo determinado. El modelo probabilístico para la distribución de frecuencias de una variable aleatoria continua implica la selección de una curva, generalmente regular o aislada, a la que se llama distribución de probabilidad o función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria. Si la ecuación de esta distribución de probabilidad continua es $f(x)$, entonces la probabilidad de que x esté en el intervalo $a < x < b$ es el área bajo la curva de distribución para $f(x)$ entre los dos puntos a y b (Figura 1).

Esto concuerda con la interacción de un histograma de frecuencias relativas, donde las áreas sobre un intervalo, bajo el histograma, corresponden a la proporción de observación que ocurre en dicho intervalo. Las afirmaciones probabilísticas acerca de las variables aleatorias continuas siempre corresponden a áreas bajo la distribución de probabilidad sobre un intervalo, por ejemplo, de a a b , y se expresan como $P(a < x < b)$. Nótese que la probabilidad en $a < x < b$ es igual a la probabilidad de que $a < x = b$, pues $P(x = a) = P(x = b) = 0$. Hay muchas distribuciones de probabilidad continuas y cada una se representa mediante una ecuación $f(x)$, que se escoge de la manera que el área total bajo la curva de distribución de probabilidad sea igual a 1. (Badii & Castillo, 2009).

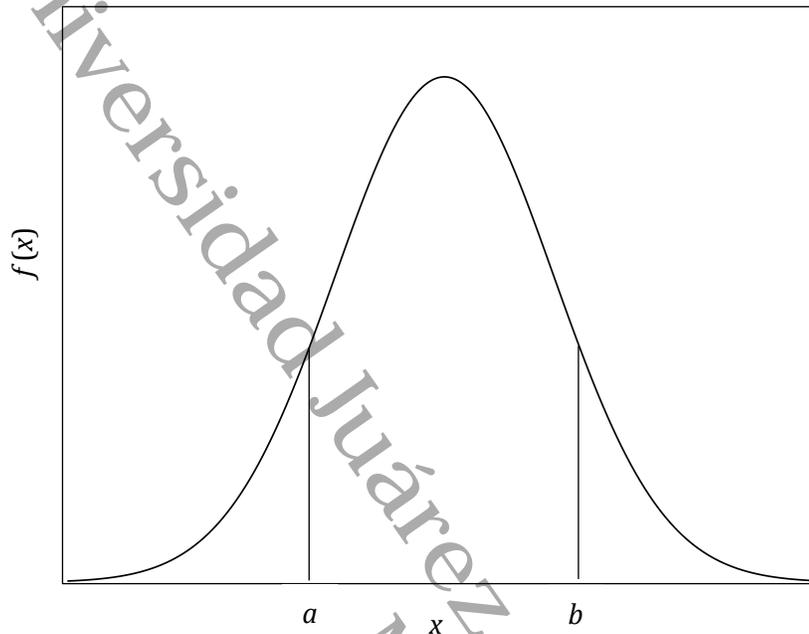


Figura 1. Área bajo la curva de la función de densidad de probabilidad gaussiana, $P(a \leq x \leq b)$.

2.7.1. Distribución uniforme

La distribución uniforme es útil para describir una variable aleatoria con probabilidad constante sobre el intervalo $[a, b]$ en el que está definida. Esta distribución presenta una peculiaridad importante: la probabilidad de un suceso dependerá exclusivamente de la amplitud del intervalo considerado y no de su posición en el campo de variación de la variable. Cualquiera sea la distribución F de cierta variable X , la variable transformada $Y = F(X)$ sigue una distribución uniforme en el intervalo $[0, 1]$. Esta propiedad es fundamental por ser la base para la generación de los números aleatorios de cualquier distribución en las técnicas de simulación. La función de densidad de la distribución uniforme se expresa por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a < x < b \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

Lo más significativo a destacar de esta distribución es que su esperanza (media) está dada por:

$$E(x) = \frac{a+b}{2} \quad (2)$$

y su varianza por:

$$\sigma^2 = Var(x) = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (3)$$

La función de distribución dada una variable aleatoria uniforme es:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (4)$$

2.7.2. Distribución normal o gaussiana

La distribución normal se utiliza cuando existe una variable aleatoria continua, donde dicha variable puede asumir cualquier valor de una gama de ellos y por tanto la distribución de probabilidad es continua. La distribución normal representa las siguientes propiedades:

1. La curva es simétrica, tiene un solo pico, por consiguiente, es unimodal y presenta una forma de campana.
2. La media de una población distribuida normalmente se encuentra en el centro de su curva normal.
3. A causa de la simetría de la distribución normal de probabilidad, la media, la moda y la mediana de la distribución se encuentran también en el centro; en consecuencia, para una curva normal, la media, la mediana y la moda tienen el mismo valor.

4. Teóricamente, la curva se extiende en ambas direcciones, y tiende gradualmente a ser asintótica con el eje de la abscisa.

Por consiguiente, uno de los más importantes ejemplos de una distribución de probabilidad continua es la *distribución normal o distribución gaussiana*, que está definida por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

Esta función de densidad de probabilidad puede expresarse en términos de una variable estándar z , con media $\mu = 0$ y $\sigma = 1$:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (6)$$

cuya representación gráfica se muestran en la **Figura 2**. Algunos aspectos matemáticos relacionados a la distribución normal son:

1. Aproximadamente el 68.3% de todos los valores de una población normalmente distribuida se encuentra dentro de ± 1 desviación estándar de la media.
2. Aproximadamente 95.5% de todos los valores de una población normalmente distribuida se encuentran dentro de ± 2 desviaciones estándar de la media.
3. Aproximadamente 99.7% de todos los valores de una población normalmente distribuida se encuentran dentro de ± 3 desviaciones estándar de la media.

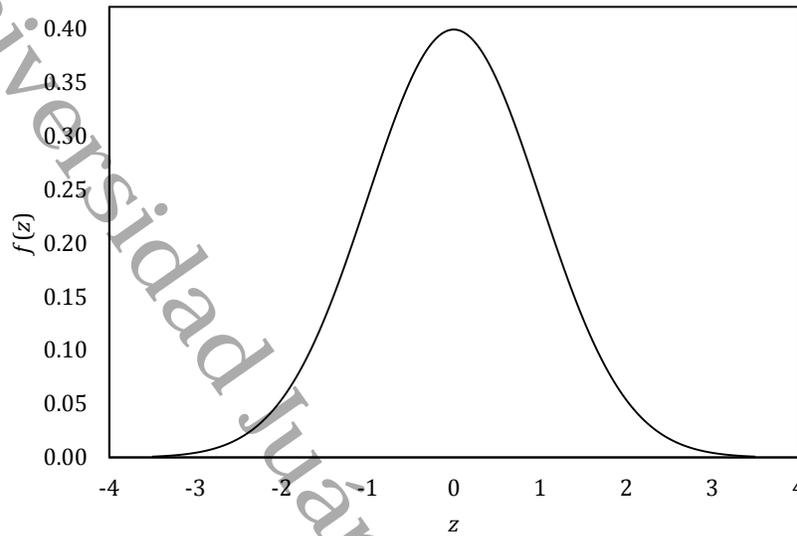


Figura 2. Representación gráfica de la distribución normal estándar.

2.7.3. Distribución beta

La distribución beta es adecuada para variables aleatorias continuas que toman valores en el intervalo $[0, 1]$, lo que la hace muy apropiada para representar proporciones. Uno de los principales recursos de esta distribución es el ajuste a una gran variedad de distribuciones empíricas, pues adopta formas muy diversas dependiendo de cuáles sean los valores de sus parámetros α y β , los cuales definen la forma de la distribución. Se dice que una variable aleatoria x tiene una distribución de probabilidad beta estándar con parámetros $\alpha > 0$ y $\beta > 0$ si y solo si la función de densidad de x está representada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{\mathbf{B}(\alpha, \beta)}, & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (7)$$

donde la función beta es definida por:

$$\mathbf{B}(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)}, \quad \text{para } \alpha, \beta > 0 \quad (8)$$

donde Γ es la función gamma. De acuerdo con (Santiwipanont, 1999), la media (μ) y la varianza (σ^2) de la distribución beta estándar son expresadas como:

$$\mu = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} \quad (10)$$

Las ecuaciones (7), (9) y (10) expresan a la distribución beta estándar; esto es, con la variable aleatoria $0 \leq x \leq 1$. En el caso de la distribución beta definido en un intervalo positivo $[a, b]$, las expresiones matemáticas son:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\mathbf{B}(\alpha, \beta)} \frac{(x - a)^{\alpha-1}(b - x)^{\beta-1}}{(b - a)^{\alpha+\beta-1}}, & \text{si } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (11)$$

con media y varianza definidas por:

$$\mu = a + (b - a) \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (12)$$

$$\sigma^2 = (b - a)^2 \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} \quad (13)$$

Estas tres expresiones se emplearán para representar la distribución de costos, donde a es el costo mínimo y b es el costo máximo recopilados de los proveedores. Para un conjunto de costos recopilados, los parámetros α y β de la distribución beta se pueden calcular numéricamente. La estimación de los parámetros de la distribución beta se realizó con la herramienta de optimización *Solver*® de Microsoft Excel.

3. MÉTODOS

3.1. Delimitación del ciclo de vida

El análisis de costos considerará algunas etapas del análisis de ciclo de vida (LCA) de tipo *cuna a la tumba* bajo los lineamientos establecidos por (Guinée, 2002), los cuales son: 1) instalación, 2) mantenimiento y reemplazo de materiales, 3) desmantelamiento y 4) disposición final de residuos (**Ver Figura 3**).

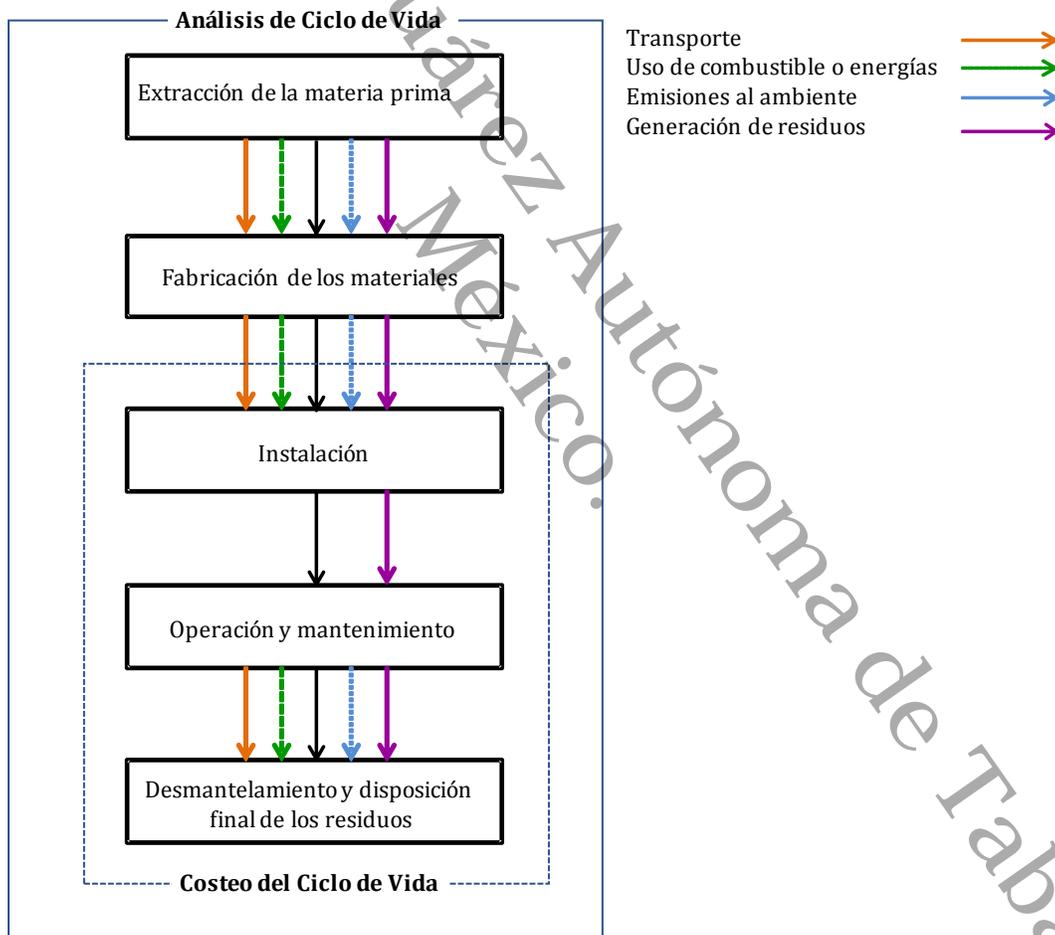


Figura 3. Alcance del coste del ciclo de vida con relación al análisis de ciclo de vida de un techo verde extensivo (Adaptado de Bolívar-Fuentes, 2015).

3.2. Recopilación de la información de costos

Durante el mes de abril de 2018 se recopilaron costos unitarios de diversos materiales de construcción necesarios para instalar un techo verde extensivo. Se visitó a una decena de proveedores locales y nacionales especializadas en estos materiales, obteniéndose entre cinco y ocho valores para costo unitario. Estas empresas emplean distintas tecnologías en sus productos que garantizan el óptimo desempeño de sus componentes entre sí, por lo que se solicitó a cada una de ellas los precios de las capas que exige un tipo de techo verde extensivo. De la misma manera, se solicitaron cotizaciones a proyectistas profesionales en la instalación de estos materiales, así como en el desarrollo de obra civil. La información principal recopilada con los contratistas fue el número de jornadas de trabajo y el costo unitario por servicio de honorarios por mano de obra y supervisión.

Además de los materiales que conforman las capas de un techo verde extensivo, se cotizaron todos los materiales necesarios para la correcta instalación de un techo verde (desde clavos de acero galvanizados hasta el tipo de vegetación que se propagará en el techo), así como la mano de obra requerida en todas las etapas del ciclo de vida consideradas (Instalación, mantenimiento del techo verde, desmantelamiento y disposición final de los residuos).

La información recopilada de costos fue analizada estadísticamente para determinar su estadística de tendencia central, se obtuvieron los valores de asimetría y curtosis, y se aplicó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk (para tamaños de muestra menores a 50) para conocer si la distribución de cada uno de los costos es normal. En los casos en donde la prueba determinó que los datos no se comportaron como parte de una distribución normal, se empleó la distribución beta para representar la distribución de estos costos.

3.3. Características de la edificación y su consumo energético

Con la finalidad de determinar la relación costo-beneficio de la instalación de un techo verde extensivo, es necesario comparar el costo total del proyecto, con el beneficio del ahorro energético asociado a éste, por lo que es importante establecer los requerimientos energéticos mediante las características de una edificación o vivienda (ocupación, sistemas de aire acondicionado, iluminación, equipo eléctrico) y posteriormente los parámetros que se deseen modificar (características y cantidad de sistemas de aire acondicionado).

Bajo condiciones de clima tropical húmedo, la determinación del cálculo de energía eléctrica requerida por una vivienda con las mismas características de este estudio fue realizada por Fuentes Velasco (2014). En el cálculo, se establecen las dimensiones, los espacios arquitectónicos, tipo de construcción y materiales, consumo energético y demás características de utilidad de la edificación **Tipo A**. Esta edificación cuenta con 6 m de longitud, 10 m de anchura y una altura de 2.7 m. En ella se delimitaron siete espacios; nivel inferior, cocina, escaleras, nivel superior/estudio, baño, recámara principal y recámara secundaria (**Ver Tabla 3**).

Tabla 3. Áreas de construcción de la edificación, Fuente: (Fuentes Velasco, 2014)

Espacios	Área de Construcción (m ²)
	Tipo A
Nivel Inferior	45.0
Cocina	12.0
Escaleras	6.0
Nivel Superior/estudio	24.4
Baño	5.0
Recámara principal	15.6
Recámara secundaria	12.0
Total	120

Materiales y Construcción

Se definieron las siguientes construcciones, con sus respectivos materiales que se enlistan en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Materiales de construcción para los elementos estructural/arquitectónicos de la edificación
Tipo A. Fuente: (Fuentes Velasco, 2014)

Construcción	Material	Espesor (cm)
Muro de carga	Concreto normal	20.3
Muro ligero	Concreto ligero	10.2
Techo interior	Concreto normal	20.3
Techo exterior	Concreto normal	20.3
Suelo	Concreto normal	10.2
Ventana	Vidrio	0.5
Puerta interior	Madera	4.5
Puerta exterior	Madera	10

Iluminación y equipo interior

Se consideraron focos de 25 W para todas las áreas de la edificación. Los aparatos eléctricos fueron estimados en la simulación utilizando el software *EnergyPlus*; sus respectivos consumos eléctricos se muestran en la **Tabla 5**.

Ocupación del edificio

El tipo de edificación estudiada es de clase unifamiliar, la construcción está destinada para alojar una sola familia, la cual está conformada por cuatro integrantes: dos adultos y dos menores de 12 años. Fuentes Velasco, (2014) menciona que la actividad de un adulto de la familia tiene un horario de trabajo fuera del hogar de 07:00 a 15:00 horas y el otro de 09:00 a 18:00 horas. En cuanto a los menores de edad, consideró un horario escolar de 7:00 a 14:30 horas. Además, estimó que el desayuno se toma entre las 06:00 y 08:00 horas. Posteriormente, la comida de 15:00 a 16:30 horas. Seguido de esto, menciona que los menores de edad realizan labores escolares, y contó con que uno de ellos realizará una actividad extraescolar de 17:30 a 18:30 horas. La hora de la cena la estableció de 20:00 a 21:00 horas. Finalmente, la hora de dormir para los menores de edad es a las 21:30 y para los adultos, a las 22:30 horas.

Tabla 5. Consumo eléctrico de los equipos empleados en la edificación residencial
(Fuentes Velasco, 2014)

Equipo eléctrico	Consumo eléctrico (W)
Nivel Inferior	
Televisor a color	150
Ventilador	120
Teléfono digital	40
Cocina	
Refrigerador	650
Extractor de jugos	250
Cafetera	850
Batidora	150
Horno de microondas	1200
Tostador Eléctrico	1000
Licuadaora	350
Ventilador	150
Lavadora	375
Bomba para agua	400
Baño	
Secadora de pelo	1350
Nivel Superior/estudio	
Ventilador	120
Computadora de escritorio	150
Cargadores de teléfono celular (2)	13
Consola de videojuegos	180
Teléfono	40
Impresora	170
Módem	30
Recámara Principal	
Televisor	150
Reproductor DVD	25
Ventilador	120
Recámara Secundaria	
Televisor	150
Reproductor DVD	25
Ventilador	120

Sistemas de aire acondicionado

Debido a las altas temperaturas en zonas con clima tropical húmedo, es común el uso de sistemas de aire acondicionado para la adecuación térmica de los espacios.

En viviendas en donde el poder adquisitivo de sus ocupantes lo permite, es común encontrar más de un sistema de aire acondicionado en las viviendas o edificaciones, e incluso en las zonas comunes (sala, comedor y estudio). Para este estudio se consideró el *subtipo A5* de Fuentes Velasco (2014), donde la edificación cuenta con 3 aires acondicionados situados en el segundo nivel; uno en cada recámara, cumpliendo con los horarios nocturnos de funcionamiento y de acuerdo con el horario de sueño.

Techo verde

Con la finalidad de obtener el ahorro energético y la sustentabilidad de la edificación con techo verde, se emplearon las dos simulaciones del consumo energético para la edificación **Tipo A; Subtipo A5** propuestas por (Fuentes Velasco, 2014), una de ellas se consideró un techo convencional (C.R.) y en la otra un techo verde (G.R.) por su siglas en inglés. El tipo de vegetación utilizado en la unidad experimental del monitoreo de las variables fueron *Tradescantia spathacea*, *Tradescantia pallida* y *Cyperus ligularis*.

Tarifas de energía eléctrica

Se utilizaron los precios establecidos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) del año 2018 a la tarifa 1D que es aplicable al servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 31°C, la cual permite un consumo máximo de 2000 kWh/bimestre antes de ingresar a la tarifa doméstica de alto consumo. Los meses de marzo a agosto se consideraron los más cálidos del año (Fuentes Velasco, 2014). Los costos por kWh se muestran en la **Tabla 6**.

Para realizar los cálculos del precio de la energía eléctrica, la CFE utiliza la tarifa del segundo mes completo del bimestre, por lo que se utilizaron las tarifas correspondientes al mes en el que finaliza el periodo de facturación correspondiente.

Tabla 6. Costos por kWh según la tarifa 1D. Fuente (CFE, 2018).

Tipo de Consumo	Tarifa por kWh (M.N.) para meses del año 2018					
	Meses menos cálidos					
	Enero	Febrero	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Básico ($x \leq 75$)*	0.793	0.793	0.793	0.793	0.793	0.793
Intermedio ($75 < x \leq 200$)	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956
Excedente ($x > 200$)	2.802	2.802	2.802	2.802	2.802	2.802
Tipo de Consumo	Meses más cálidos					
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
	Básico ($x \leq 175$)	0.697	0.697	0.697	0.697	0.697
Intermedio bajo ($175 < x \leq 400$)	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822	0.822
Intermedio alto ($400 < x \leq 600$)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Excedente ($x > 600$)	2.802	2.802	2.802	2.802	2.802	2.802

* x = energía eléctrica utilizada en kilowatts/hora (kWh).

3.4. Interfaz gráfica de usuario empleando Visual Basic para Aplicaciones

Microsoft Excel contiene un lenguaje de programación que permite a los usuarios crear procedimientos, también llamados macros, capaces de realizar cálculos avanzados o que puede automatizar cálculos repetitivos. El lenguaje de programación de *Excel* es *Visual Basic para Aplicaciones* (VBA), el cual tiene una serie de códigos que permiten al programador trabajar con libros de hojas de cálculo de Excel, celdas, gráficos, entre otros (Billo, 2007). Para el desarrollo del modelo de cuantificación de costos del proyecto, se empleó el cuadro de diálogo *Userform*, conocido también como formulario. En el ambiente de VBA, se pueden desarrollar interfaces gráficas con un lenguaje de programación orientado a objetos. La interfaz gráfica no es más que el conjunto de imágenes y objetos que representan la información y permiten realizar acciones (eventos) que a su vez ejecutan métodos y realizan cambios en las propiedades de los mismos objetos (García Pech, 2010)

El diseño de la interfaz tomó en cuenta una estructura general del programa conformado por cuatro **Frames** (marcos) dentro del **Userform** (formulario): *Proyecto, Mano de obra, Insumos y Simulación Monte Carlo*. Estos a su vez contienen diferentes herramientas que lo integran, como: **Labels** (etiquetas), **TextBox** (cuadros de texto), **CheckBox** (cuadro de verificación), **ComboBox** (cuadro combinado), **OptionButton** (botón de opción), **CommandButton** (botón de comando), entre otros, los cuales permiten la entrada y salida de la información hacia una hoja de cálculo de Excel. Las acciones de cada control se especifican como código de programación dentro del **Userform** y de las subrutinas de los eventos.

3.4.1. Declaración de variables

Los códigos de programación de VBA consisten en declaraciones que son necesarios y a su vez requeridos en todo tipo de programación. Las declaraciones se construyen utilizando comandos de VBA, operadores, variables, funciones, objetos, propiedades, métodos u otras palabras clave de VBA. Gran parte del código que se crea consiste en la asignación del resultado de una expresión a una variable u objeto (Billo, 2007). Estas variables son declaradas justo antes de escribir la primera subrutina; es decir, en la parte superior del módulo. A las unidades del código VBA, también llamadas macros y que se encuentran dentro del **Userform** y de la **Subroutine**, se les declaró el tipo de variable: *integer* para los parámetros con variables cuantitativas discretas; *double* para los parámetros con variables cuantitativas continuas. En la subrutina se realizaron acciones específicas aceptando argumentos como variables o expresiones. Además, se utilizaron los dos tipos de estructuras básicas en la programación de un algoritmo, a saber, la estructura condicional (*If-Else*) y la repetitiva (*For-Next*).

3.4.2. Programación de la interfaz

El siguiente paso fue la programación de la interfaz. Esto último implica interconectar los componentes de la interfaz y asignar las subrutinas correspondientes. La programación de los componentes de la interfaz se realizó a través de la

programación de los **ComandButton**, que son los que ejecutan la mayor parte de los procedimientos del programa. Otros controles ejecutores de acciones fueron **OptionButton** y **ComboBox** a través de sus eventos respectivos *Click* y *Change*.

3.5. Análisis de costos

El análisis de costos consideró los diversos costos directos e indirectos, fijos y variables, para cada etapa del ciclo de vida que conformó el costo total del proyecto: *i*) instalación, *ii*) mantenimiento y reemplazo, *iii*) desmantelamiento y disposición final de los residuos. En la **Figura 4** se presentan las etapas en las que se tiene que incurrir en los costos asociados durante todo el ciclo de vida del proyecto. El análisis de costos se realizó en *Microsoft Excel* para facilitar su integración con el método de simulación estocástica tipo Monte Carlo. La etapa de instalación del techo verde contiene la mayor parte de los costos unitarios con incertidumbre, por lo que sólo se consideró la simulación estocástica para esta etapa. Las etapas restantes fueron representadas como un modelo determinístico.

3.6. Aspectos de la simulación estocástica

En la etapa de instalación, algunos costos presentan mayor incertidumbre, por lo que éstos fueron representados como funciones de probabilidad cuyos rangos, tipos y formas (uniforme, normal gaussiana, beta) dependerá de la información de costos recolectada por los proveedores locales, así como información obtenida de literatura especializada. Para el tratamiento estocástico del modelo, se empleará una simulación tipo Monte Carlo que consiste en realizar n eventos estocásticos (estimaciones del costo total de instalación) para generar una función distribución final de ese costo total. Esta función de distribución permitió determinar, con bases estadísticas, los valores mínimo, medio y máximo del costo total de instalación con un 95% de intervalo de confianza.

Las funciones generadoras de costos aleatorios para cada distribución de probabilidad son:

Distribución uniforme:

$$\text{costo}(j) = \text{costo}_{inf}(j) + Rnd[\text{costo}_{sup}(j) - \text{costo}_{inf}(j)] \quad (14)$$

Distribución gaussiana:

$$\text{costo}(j) = Norm_Inv[\gamma + Rnd(1 - 2\gamma), \mu, \sigma] \quad (15)$$

Distribución beta:

$$\text{costo}(j) = Beta_Inv[Rnd, \alpha, \beta, \text{costo}_{inf}(j), \text{costo}_{sup}(j)] \quad (16)$$

Donde $\text{costo}(j)$ es el costo j generado aleatoriamente a partir del costo mínimo $\text{costo}_{inf}(j)$, del costo máximo, de la función aleatoria Rnd de Microsoft Excel, $Norm_Inv$ es la función normal inversa de Microsoft Excel, que requiere tres datos para generar el costo: 1) la probabilidad, la cual se representó aleatoriamente por $\gamma + Rnd(1 - 2\gamma)$, 2) la media μ , y 3) la desviación estándar σ . Por su parte, la función de Excel $Beta_Inv$ representa a la función inversa de la distribución beta misma que requiere cinco datos para generar el costo aleatorio: 1) la probabilidad, representada por la función aleatoria Rnd , 2) el parámetro α de la distribución, 3) el parámetro β de la distribución, 4) el costo mínimo del costo j y 5) el costo máximo del costo j . El índice j representa a los costos que fueron seleccionados como inciertos y, por lo tanto, estocásticos. En el **Anexo A** se presentan los costos considerados como aleatorios, para diferentes escenarios de simulación.

Debe notarse que, durante la generación aleatoria de los costos empleando la distribución gaussiana, se emplea un parámetro γ . Este parámetro es necesario para acotar la distribución gaussiana a un intervalo definido entre los límites inferior y superior $[a, b]$, ya que debe recordarse que la distribución gaussiana representa a una variable aleatoria continua en el intervalo $(-\infty, +\infty)$; es decir, está dada para todos los

números reales. El parámetro γ se puede entender de forma similar a un intervalo de confianza. Un valor de $\gamma = 0.05$ implica que el 5% de ambas colas de la distribución normal gaussiana es sesgado; esto es, se elimina la posibilidad de que la función aleatoria genere valores menores al 5% y mayores al 95% de la función gaussiana.

3.6.2. Criterios establecidos para la simulación de los escenarios

Existen varias alternativas para instalar un techo verde extensivo. Por ejemplo, se puede considerar que no todos los insumos son adquiridos por el propietario de la vivienda, ya que algunos de ellos son herramientas cotidianas del trabajador, por lo que este suele proporcionarlas para realizar sus actividades. A continuación, se definen seis escenarios que fueron considerados durante la simulación estocástica.

El criterio establecido para el escenario 1 fue la selección de un “*Techo Nuevo*”; teniendo en cuenta que al seleccionar esta opción no se consideran los costos del lavado y desinfección de la losa de la **Etapa 1** de mano de obra directa y los costos de los insumos de la misma (**Ver Figura A.3 y Figura A.4**), esto puede corresponder a diversos casos: que la losa ha sido construida recientemente; que la losa no cuente con otro tipo de impermeabilizante aplicado o que esta se encuentre en buenas condiciones debido a un mantenimiento habitual. El tipo de distribución de probabilidad fue gaussiana para los dos costos. Se agregaron a la simulación todos los insumos necesarios para la instalación del techo verde, tanto materiales como herramientas de trabajo (**Ver Figura A.8 y Figura A.9**).

Por su parte, en el escenario 2 se considera el lavado y la desinfección de la losa. En contrariedad al primer escenario, el costo total de la instalación del techo verde sí considera la **Etapa 1** de los costos de mano de obra directa y de los insumos, por lo que se optó por la opción de “*Techo Viejo*” y función de probabilidad gaussiana (**Ver Figura A.2 y Figura A.6**), esto puede corresponder a múltiples casos: que la losa de la edificación sea longeva y/o no reciba mantenimiento; que la losa cuente con otro

tipo de impermeabilizante a los recomendados para la instalación adecuada del techo verde extensivo, por lo que sea necesario eliminarlo; entre otros. El tipo de distribución de probabilidad fue gaussiana para los insumos (**Figura A.12**). Se agregaron a la simulación todos los insumos necesarios para la instalación del techo verde (**Figura A.8 y Figura A.9**).

Con la finalidad de comparar y observar el comportamiento de los costos de mano de obra directa y de los Insumos, se decidió simular el escenario 3 con la opción de “*Techo Viejo*” y función de probabilidad uniforme para ambos (**Ver Figura A.11**). Nuevamente, en esta simulación se considera la adquisición de todos los insumos necesarios para la instalación.

Para el escenario 4 se seleccionó la opción de “*Techo Viejo*” y función de probabilidad gaussiana para los costos de mano de obra directa y los insumos (**Ver Figura A.2 y Figura A.6**). Existe cierta similitud con el escenario 2; sin embargo, la diferencia es que en este escenario se seleccionaron solo los materiales y/o los insumos esenciales de la instalación del techo verde excluyendo aquellos que, por lo general, son herramientas que el trabajador posee. Los insumos seleccionados se pueden observar en las **Figuras A.8 y Figura A.9**. Debido a que el trabajador suele contar con sus propias herramientas de trabajo, se consideró que este escenario es el más probable.

En el escenario 5 se seleccionaron todas las etapas de instalación de la mano de obra directa con una función de distribución gaussiana (**Ver Figura A.2 y Figura A.6**). Asimismo, se seleccionaron los materiales y/o herramientas del escenario 4 con el tipo de distribución gaussiana a excepción de dos materiales: el impermeabilizante prefabricado SBS de la **Etapas 3** y la lámina nodular de polietileno para drenaje anti-raíz de la **Etapas 4** que se simularon con el tipo de distribución beta. Esto se debe a que algunas empresas de las que se obtuvo el presupuesto de estos insumos cotizan a

precio de \$USD, por lo que realizan el tipo de cambio a \$MXN sujeto a cambios continuos.

El escenario 6 se simuló bajo los mismos criterios del escenario 5, descartando el costo de mano de obra directa de la instalación del techo verde, de esta forma solo se simulará el costo de los materiales de instalación.

Los resultados de las simulaciones estocásticas para los seis escenarios fueron graficados y analizados estadísticamente empleando el software *SigmaPlot* 11.0 (Systat Software Inc.; San José, USA). Los estadísticos aplicados a los datos fueron pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors, con 95% de confianza), percentiles al 5%, 50% (mediana) y 95%.

3.7. Relación beneficio-costos del ciclo de vida del techo verde

La relación beneficio-costos (B/C) del proyecto del techo verde extensivo se desarrolló bajo ciertos criterios metodológicos descritos por (Aguaza, 2012):

En primer lugar, se identificó claramente el proyecto y se obtuvo un amplio conocimiento de cómo ejecutarlo. Esto implicó conocer todas las etapas que componen la instalación del techo verde extensivo, así como los costos de mano de obra y de los insumos. Como se mencionó anteriormente en el **Apartado 3.1**, el análisis de ciclo de vida de los costos del techo verde se delimitó a las etapas de instalación, mantenimiento, reemplazo de materiales y, desmantelamiento y disposición de residuos sobre una edificación previamente construida. Se consideró que el proyecto tiene una vida útil de 40 años, no obstante Mahdiyari *et al.*, (2016), mencionan que se espera que la vida útil de un techo verde sea de más de 40 años. Diversos investigadores han reportado diferentes vidas útiles para los techos verdes. Por ejemplo, Peri *et al.*, (2012) mencionaron que la longevidad de un techo verde en Europa es dos veces más que el techo convencional. (Kosareo & Ries, 2007) Indicaron

una vida útil de 45 años en un caso de estudio en Pittsburgh, PA, USA. Así también, (Ulubeyli & Arslan, 2017) consideran 40 años de vida útil para un techo verde.

Antes de calcular una relación B/C todos los beneficios positivos, negativos y costos identificados deben convertirse a las mismas unidades monetarias. La unidad puede ser valor presente, valor anual o valor futuro equivalente, en este estudio se consideró el uso del valor presente para todos los costos y beneficios identificados. Con el propósito de calcular el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto, se empleó la expresión de (Blank & Tarquin, 1999), también conocida como **factor P/F**:

$$P = \sum_{j=i}^N F_j = \left[\frac{1}{(1+i)^{n_j}} \right] \quad (17)$$

Con ayuda de esta expresión se determina el valor presente P , donde F_j son los costos a futuro del mantenimiento y reemplazo de la membrana drenante correspondientes al periodo n_j siendo N el tiempo de vida útil del proyecto, a una tasa de interés i inflada del 8% que considera en conjunto una tasa de rendimiento y una tasa de inflación, de acuerdo con un instrumento convencional de ahorro e inversión en México, conocido como CETES directo (CONDUSEF, 2019).

3.7.1. Costos

Los costos son los gastos anticipados por construcción, operación, etc., menos cualquier valor de salvamento (Blank & Tarquin, 1999). Los costos son considerados como aquellos requeridos en la inversión inicial. Estos costos son los de instalación, reemplazo de materiales y desmantelamiento del techo verde.

Costos de instalación

Los costos asociados a la instalación del techo verde se encuentran enlistados en el **Anexo A** en sus respectivas etapas, las cuales son: *i*) Etapa 1. Lavado y desinfección de

losa; *ii*) Etapa 2. Aplicación del primario asfáltico; *iii*) Etapa 3. Instalación de impermeabilizante prefabricado SBS; *iv*) Etapa 4. Instalación de la lámina nodular de polietileno para drenaje anti-raíz; *v*) Etapa 5. Aplicación de la materia orgánica y; *vi*) Etapa 6. Aplicación de la vegetación. En las **Figuras A.5 y A.6** se observan los costos de mano de obra directa y en las **Figuras A.8 y A.9** se presentan los costos de los insumos.

Costos de reemplazo de materiales

Durante el tiempo de vida útil del proyecto, cada 10 años se realiza el reemplazo de la membrana drenante de polietileno anti-raíz, con un costo total estimado de \$14,003.43 MXN, el cual incluye el costo de la mano de obra y de la membrana (**Tabla 7**).

Tabla 7. Costo de mano de obra por etapas y de la membrana drenante para reemplazo cada 10 años.

Reemplazo de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje	Mano de Obra	Número de Trabajadores	Costo (\$/MXN)	Días Trabajados	Costo Total por Etapas (\$/MXN)
Etapa 1. Remoción de la vegetación, materia orgánica y membrana drenante	Supervisor Técnico	1	\$500.00	1	\$1,100.00
	Obrero	2	\$300.00		
Etapa 2. Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje	Supervisor Técnico	1	\$500.00	2	\$2,200.00
	Obrero	2	\$300.00		
Etapa 3. Aplicación de la Materia Orgánica	Supervisor Técnico	1	\$500.00	2	\$2,200.00
	Obrero	2	\$300.00		
Etapa 4. Aplicación de la Vegetación	Supervisor Técnico	1	\$500.00	2	\$1,600.00
	Obrero	1	\$300.00		
Costo de Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje					\$6,903.43
Total					\$ 14,003.43

Costos por desmantelamiento del techo verde

Cabe señalar que los costos generados en la etapa de desmantelamiento del techo verde se consideraron también en la inversión inicial, una vez concluida la vida útil del techo verde extensivo, se requiere el desmantelamiento y la disposición final de los residuos, por lo que se estimó un costo de mano de obra de \$ 1,700.00 MXN para este concepto (**Tabla 8**).

Tabla 8. Costo de mano de obra por desmantelamiento del techo verde extensivo.

Actividad	Mano de Obra	Número de Trabajadores	Costo (\$/MXN)	Días Trabajados	Costo Total
Desmantelamiento del Techo Verde Extensivo y Disposición final de los Residuos..	Supervisor Técnico	1	\$500.00	1	\$1,700.00
	Obrero	4	\$300.00		

Los residuos generados de características domiciliarias (orgánicos e inorgánicos) serán depositados en contenedores temporales. Estos residuos serán recolectados por el servicio de recolección municipal. Asimismo, los residuos producto de la vegetación y la materia orgánica removida serán colocados en zonas de jardín para su incorporación al suelo por procesos naturales de degradación. Dicho lo anterior, se entiende que estas actividades no generan costos adicionales.

3.7.2. Beneficios negativos

Los beneficios negativos son las desventajas para el propietario cuando el proyecto bajo consideración es implementado (Blank & Tarquin, 1999). Se establecieron como beneficios negativos las etapas de mantenimiento y reemplazo del techo verde durante el tiempo estimado de la vida útil del proyecto. A continuación, se identifican y describen las actividades de mantenimiento del techo verde, la periodicidad en la que se realizan y los costos respectivamente:

Mantenimiento:

- **Riego:** Acción de proveer los niveles de humedad óptimos para evitar el estrés hídrico de la vegetación. Se estableció que la frecuencia en la que se realiza esta actividad es de cada 3 días del 15 de febrero al 15 de mayo debido a los periodos de sequía.
- **Poda y deshierbe:** Actividad que permite mejorar la capacidad de desarrollo de la vegetación y la estética del techo verde. La frecuencia de esta actividad dependerá del tipo de vegetación y el grado de implicación del propietario de

la vivienda en estas tareas. Esta actividad podría realizarse, como máximo, cada 30 días.

- **Fertilización:** Acción necesaria para mantener los niveles de nutrientes satisfactorios en el sustrato. La aplicación del fertilizante se realiza anualmente.

En el caso de que el propietario no esté implicado en el mantenimiento del techo verde, las actividades de poda, deshierbe y fertilización son realizadas por un jardinero cuya jornada de trabajo tiene un costo unitario actual que varía de \$ 300.00 a \$ 350 MXN. Con visitas cada mes, el costo anual asciende entre \$ 3,600.00 y \$4, 200.00 MXN.

Por concepto de insumos, (fertilizante, alguna herramienta o refacción que se requiera), el costo anual es de \$1, 000.00 MXN, entonces el costo de mantenimiento incluyendo mano de obra es un total de entre \$ 4, 600.00 y \$5, 200.00 MXN anuales.

3.7.3. Beneficios positivos

Blank & Tarquin (1999) mencionan que los beneficios positivos son aquellas ventajas experimentadas por el propietario. De acuerdo con los resultados obtenidos del consumo energético de una vivienda con techo convencional comparada con una con techo verde anteriormente descritas, se obtuvo el ahorro energético donde los kWh serán transformados a valores monetarios de acuerdo a la tarifa proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (2019). Este ahorro energético estará asociado a los beneficios positivos. Asimismo, se considera dentro de los beneficios positivos un descuento en el impuesto predial y un bono por la captura de carbono.

3.7.4. Relación convencional B/C

Una vez identificados y transformados a valores monetarios los beneficios positivos, los beneficios negativos y los costos, podemos utilizar la ecuación de la relación convencional de beneficio-costos, la cual se calcula de la siguiente manera de acuerdo con (Blank & Tarquin, 1999):

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios positivos} - \text{Beneficios negativos}}{\text{Costos}} = \frac{B - BN}{C} \quad (18)$$

Una relación B/C mayor 1.0 indica que el proyecto evaluado es económicamente ventajoso.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Recopilación de costos unitarios

Se obtuvo la cotización de cinco empresas reconocidas a nivel nacional especializadas en productos de impermeabilización para techos verdes, estas son: Curacreto S. A de C. V, Imperquimia S. A de C. V, Fester S. A de C. V, Sika Mexicana S. A de C. V y, Delta: Membranas y Soluciones S. A de C. V.

A continuación, se muestran las **Tablas** de costos unitarios de los productos impermeabilizantes de cada una de las empresas a las que se le solicitó información para un área de techo verde. La cuantificación de materiales se realizó de acuerdo con las dimensiones de la edificación **Tipo A** propuesta por (Fuentes Velasco, 2014), la cual considera un área de construcción de la planta alta de 63 m² en la que puede ser instalado el techo verde extensivo.

Tabla 9. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Curacreto S. A de C. V.

CURACRETO S. A de C. V					
Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Rendimiento	Presentación	Cantidad	Costo unitario*
PRIMERCRETO S	Sellador y primario, base solvente, para superficies de concreto.	4 a 6 m ² /L	Cubeta 19 L	1	\$638.57
TECHNOPLY SBS 3.00MM	Impermeabilizante prefabricado formulado a base de asfalto, modificado SBS.	8.9 m ² ; traslapes de 10 cm	Rollo de 10 m ²	8	\$759.36
TECHNOPLY GARDEN	Membrana impermeabilizante anti-raíz prefabricada, con alta elasticidad y resistencia a la penetración de raíces.	8.9 m ² ; traslapes de 10 cm	Rollo de 10 m ² ; espesor 4 mm	8	\$1,216.66
GEOCRETO DREN CR	Lámina nodular de polietileno de alta densidad para drenaje de sistemas de impermeabilización en jardines elevados	40 m ²	Rollo de 2.10 m de ancho x 20 m de largo; espesor 10 mm	2	\$3,945.19

* Precios obtenidos en el mes de abril del año 2018. No incluyen I.V.A.

Tabla 10. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Sika Mexicana S. A de C. V

SIKA MEXICANA S. A de C. V Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Rendimiento	Presentación	Cantidad	Costo unitario*
EMULSIKA PRIMER	Primario asfáltico base agua de aplicación en frío de excelente adherencia sobre concreto y mortero.	1 L/m ²	Cubeta de 19 L	4	\$486.21
SIKA MANTO PRO GARDEN	Membrana impermeable prefabricada de asfalto modificado APP (Polipropileno Atáctico), con aditivo anti-raíz, provista con un refuerzo central de poliéster no tejido de alta resistencia diseñada especialmente para sistemas de techo verde.	8.9m ²	Rollo de 10 m ² ; espesor de 4.0 mm con acabado liso-arenado	8	\$1,512.00
SIKA DREN	Membrana de polietileno de alta densidad (HDPL) sin geotextil, que funciona como sistema de protección y drenaje.	40 m ² . Se tiene de 0.5 a 1.0, m ² adicional para compensar cortes en los extremos.	Rollo de 40 m ² ; espesor de 0.6 mm	2	\$4,672.41

* Precios obtenidos en el mes de abril del año 2018. No incluyen I.V.A.

Tabla 11. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Imperquimia S. A de C.V.

IMPERQUIMIA S. A de C. V Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Rendimiento	Presentación	Cantidad	Costo unitario*
IMPERCOAT® PRIMARIO S	Primario asfáltico base solvente, promotor de adherencia en sistemas de impermeabilización asfálticas, base solvente o prefabricada.	8 m ² /L	Galón de 4 L	3	\$183.93
UNIPLAS JARDIN® PLUS SBS 4.0 PG ROJO Z	Impermeabilizante prefabricado a base de bitumen modificado SBS y protección total contra la penetración de raíces.	8.8 m ²	Rollo de 10 m ²	8	\$3,055.14
UNIPLAS JARDIN® PLUS DRENAJE PROTECCION	Membrana geotextil de poliéster con soportes de polipropileno rígido, complemento filtrante del Sistema.	28.6 m ²	Rollo de 30.18 m ²	3	\$5,197.14
UNIPLAS JARDIN® PLUS DRENAJE SENCILLO	Membrana geotextil poliéster, complemento filtrante y retenedor de humedad.	9.4 m ² por cada 10 m ²	Rollo de 150 m ²	1	\$5,340.52

* Precios obtenidos en el mes de abril del año 2018. No incluyen I.V.A.

Tabla 12. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Fester S. A de C. V

FESTER S. A de C. V Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Rendimiento	Presentación	Cantidad	Costo unitario*
HIDROPRIMER	Compuesto asfáltico para sellado de superficies previo a la aplicación de sistemas impermeables asfálticos base solvente y membranas prefabricadas.	4 a 5 m ² /L	Galón de 4 L	4	\$384.00
FESTER MIP GARDEN	Manto impermeable prefabricado (MIP) con refuerzo poliéster y protección anti-raíz.	8.9 m ²	Rollo de 10 m ²	8	\$2,060.00
FESTER POLIETILENO	Película de polietileno calibre 600, recomendado para reforzar el sistema Fester Garden.	198 m ²	Rollo de 198 m ²	1	\$6,346.00
FESTER DRENANTE	Laminado de polietileno semirrígido de alta densidad moldeado para facilitar el drenado de agua.	46.5 m ²	Rollo de 48.8 m ²	2	\$6,603.00
FESTER FILTRO	Laminado de polietileno de alta densidad moldeado con geomembrana para facilitar el drenado de agua y retener finos de sustrato.	46.5 m ²	Rollo de 48.8 m ²	2	\$9,669.00

* Precios obtenidos en el mes de abril del año 2018. No incluyen I.V.A.

Tabla 13. Costos unitarios de los materiales de impermeabilización. Fuente: Delta S. A de C.

DELTA S. A de C. V Materiales de impermeabilización	Descripción del Producto	Rendimiento	Presentación	Cantidad	Costo unitario*
DELTA MS	Protección de la cimentación y generalmente no requiere el uso de preparaciones de superficie antes de la instalación de la membrana.	40 m ² ; traslapes de 40 cm	Rollo de 49 m ²	2	\$3,087.00
DELTA DRAIN	Membrana con nódulos hecha de un polietileno especial de alta densidad y tejido geotextil	40 m ² ; traslapes de 40 cm	Rollo de 49 m ²	2	\$5,145.00
POLIETILENO ANTIRAÍZ		90m ² ; traslapes de 40 cm	Rollo de 90 m ²	1	\$2,646.00
SUJETADORES			Por unidad	50	\$3.36
REMATES			Por unidad	20	\$42.00

* Precios obtenidos en el mes de abril del año 2018. No incluyen I.V.A.

Además de obtener las cotizaciones de los insumos y los materiales directos, es necesario conocer el salario de la mano de obra directa que se requiere para la construcción de un techo verde tipo extensivo de un área de 63 m² y así analizar todos los costos directos del ciclo de vida de la primera etapa (instalación), por lo que se solicitaron diversos presupuestos a tres diferentes contratistas obteniendo distintos esquemas de cobro.

En la **Tabla 14** se puede observar el análisis de los costos de la mano de obra bajo el concepto de cobro por proyecto, donde se observan las etapas que comprende la instalación del techo verde extensivo.

En cada etapa del proyecto es importante contar con al menos un Supervisor Técnico y un Obrero. El número de trabajadores, el costo y los días necesarios para concluir cada etapa del proyecto también determinan el costo de la mano de obra por etapas y el costo total. Cabe señalar que se consideró la primera etapa del proyecto como lavado y desinfección de la losa debido a la importancia de que el área donde se instalará el techo verde se encuentre seco y en buenas condiciones previo a la aplicación del primario asfáltico o cualquier tipo de membrana impermeabilizante.

Tabla 14. Análisis de los costos de mano de obra por proyecto. Fuente: Elaboración propia.

COSTO DE MANO DE OBRA					
Descripción de las Actividades por Etapa	Mano de Obra	Número de Trabajadores	Costo * (\$/MXN)	Días Trabajados	Costo Total por Etapas (MXN)
Etapa 1.	Supervisor Técnico	1	\$500.00		
Lavado y Desinfección de Losa	Obrero	1	\$300.00	1	\$800.00
Etapa 2.	Supervisor Técnico	1	\$500.00		
Aplicación del Primario Asfáltico	Obrero	1	\$300.00	1	\$800.00
Etapa 3.	Supervisor Técnico	1	\$500.00		
Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS	Obrero	2	\$300.00	1	\$1,100.00
Etapa 4.	Supervisor Técnico	1	\$500.00		
Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje	Obrero	2	\$300.00	2	\$2,200.00
Etapa 5.	Supervisor Técnico	1	\$500.00		
Aplicación de la Materia Orgánica	Obrero	2	\$300.00	2	\$2,200.00
Etapa 6.	Supervisor Técnico	1	\$500.00		
Aplicación de la Vegetación	Obrero	1	\$300.00	2	\$1,600.00
		Total		9	\$8,700.00

* Precios obtenidos en el mes de abril del año 2018.

En la **Tabla 15** se observa el análisis del concepto de mano de obra por cada m² trabajado. El diseño de la herramienta de cómputo también tiene la capacidad de generar números estocásticos de los costos de la instalación para esta opción, sin embargo, el esquema más habitual de contratación del servicio se basa en costos globales del proyecto de instalación, y no por metro cuadrado, por lo que en esta investigación se realizaron los análisis de costos y beneficios con base en el esquema de contratación por proyecto.

Tabla 15. Análisis de los costos de mano de obra por m². Fuente: Elaboración propia.

COSTO DE MANO DE OBRA	Área de Instalación (m ²)	Número de Trabajadores	Costo por m ² (\$/MXN)*	Días Trabajados	Costo Total (MXN)
Descripción de las Actividades					
Instalación de un Techo Verde Tipo Extensivo	63	2	\$75.00	10	\$9,450.00

* Precios obtenidos en el mes de abril del año 2018.

4.2. Análisis estadístico de costos unitarios recopilados

Los costos unitarios recopilados a través de cotizaciones de proveedores nacionales fueron analizados con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk resultando que todos ellos siguen una distribución normal, a excepción de los datos de costos de dos materiales de instalación: el impermeabilizante prefabricado SBS y la lámina nodular de polietileno para drenaje anti-raíz. Como resultado, fue necesario representar a las funciones de costos de estos materiales como distribuciones tipo beta. Los parámetros de las distribuciones beta para estos materiales fueron estimados empleando la herramienta de optimización *Solver* de Microsoft Excel. En la **Figura 5** se presentan las funciones de distribución beta obtenidas, así como los parámetros estimados numéricamente. Debido a que se contó solamente con cinco datos de costos para cada uno de estos materiales, no es matemáticamente viable estimar parámetros de la distribución beta. Por ello, los parámetros fueron estimados considerando los siguientes elementos: *i*) la media se relaciona con los parámetros y con los valores mínimos y máximos de los costos (Ec. 12), *ii*) la suposición de que el 25% de los costos (un cuartil) son valores cercanos al valor mínimo de costos recopilados, mientras que el 75% restante (tres cuartiles) son valores cercanos al valor máximo, y *iii*) un

coeficiente de variación del 8%, razonable para materiales de construcción (Toh *et al.*, 2012) lo que permite relacionar a la media y a la varianza (Ec. 13). Con respecto al coeficiente de variación, (Toh *et al.*, 2012) indicó que los costos críticos en proyectos de obra civil en Malasia poseen coeficientes de variación que oscilan entre 22 y 28%. Sin embargo, los materiales de construcción del techo verde deben ser adquiridos con proveedores locales dado que es deseable que se encuentren fácilmente disponibles. Por lo anterior, se ha supuesto que el coeficiente de variación de los costos de estos materiales no exceda del 8% para disminuir el grado de incertidumbre de los costos de estos materiales.

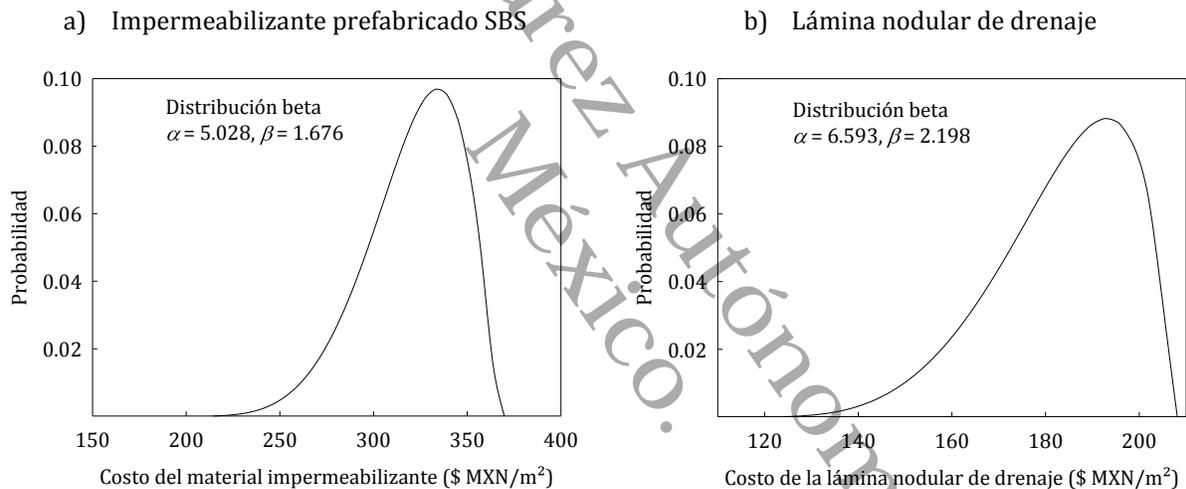


Figura 5. Funciones de la distribución beta de los materiales impermeabilizantes.

4.3. Descripción de la interfaz gráfica de usuario

En este estudio se presenta el desarrollo de una herramienta de cómputo que permite simplificar el empleo de las simulaciones estocásticas de los precios y costos totales de la instalación de un techo verde tipo extensivo. Como se menciona en el apartado de la metodología de este trabajo, el programa consiste en una plataforma visual creada con *Visual Basic para Aplicaciones* (VBA) de Microsoft Excel. El programa se empleó para facilitar la integración de los costos de los materiales, así como de la mano de obra directa con el método de simulación estocástica Monte Carlo.

El diseño de la interfaz está compuesto por dos elementos:

1. Un Formulario, creado desde el **Editor** de *Visual Basic para Aplicaciones*, utilizado para el ingreso de datos y criterios de la simulación con la ayuda del cuadro de herramientas de la pestaña **Ver** con el cual podremos colocar controles dentro del formulario que nos ayudarán a solicitar la información necesaria.
2. El Módulo, que es una Subrutina de programación donde se realizan las simulaciones a partir de los métodos numéricos que estarán vinculados con el formulario para la automatización de las tareas.

El desarrollo de la interfaz de la herramienta de cómputo para realizar las simulaciones estocásticas es mostrado en el **Anexo A** del presente trabajo.

4.4. Simulaciones estocásticas

Como se estableció en el Apartado de Métodos, se llevaron a cabo simulaciones estocásticas para determinar el efecto del grado de incertidumbre de los costos asociados a la etapa de instalación de un techo verde extensivo, siendo estos costos los que presentan mayor incertidumbre, con respecto a otras etapas del ciclo de vida del techo verde. A continuación, se describen los resultados de los seis escenarios propuestos para el costo total de instalación, teniendo como criterios principales una edificación que cuenta con un área de construcción de 63 m² en la planta alta donde puede ser instalado un techo verde extensivo y una desviación típica del 20% en los costos de mano de obra directa con un número de 10, 000 eventos para cada costo de mano de obra de la instalación y los insumos correspondientes a cada escenario.

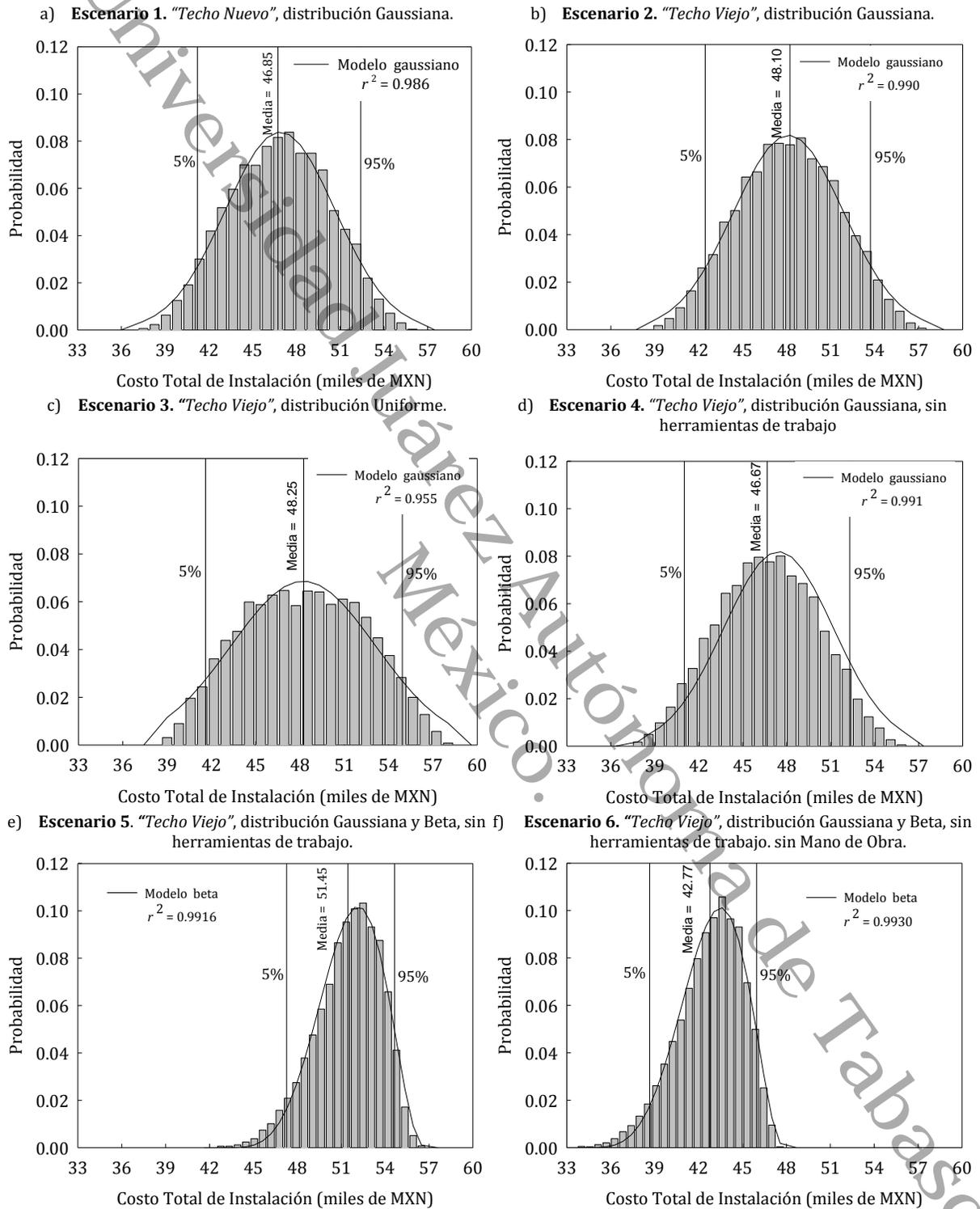


Figura 6. Distribuciones de probabilidad del costo total de instalación de un techo verde extensivo para varios escenarios de simulación.

Los resultados del escenario 1 (**Figura 6a**) muestran una función distribución de probabilidad ligeramente asimétrica en relación con el costo total de la instalación con una media de \$ 46, 846.71 MXN y una mediana de \$ 46, 892.52 MXN. Los percentiles del 5% y 95% indican que el costo mínimo con un 95% de confianza es de \$ 41,209.30 MXN y el costo máximo con un 95% de confianza es de \$ 52, 404.36 MXN, respectivamente. Con respecto a la forma de la distribución de probabilidad, la prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors determinó que no puede considerarse como una distribución normal ($K-S = 0.2366$, nivel de significancia de 0.05) a pesar de que el coeficiente de determinación fue relativamente alto ($r^2 = 0.986$).

En cuanto los resultados del escenario 2 (**Figura 6b**) muestran una función distribución de probabilidad ligeramente asimétrica en relación con el costo total de la instalación con una media de \$ 48, 103.48 MXN y una mediana de \$ 48, 125.61 MXN. Los percentiles del 5% y 95% indican que el costo mínimo con un 95% de confianza es de \$ 42,440.95 MXN y el costo máximo con un 95% de confianza es de \$ 53,709.85 MXN, respectivamente. Con respecto a la forma de la distribución de probabilidad, la prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors determinó que no puede considerarse como una distribución normal ($K-S = 0.2299$, nivel de significancia de 0.05) a pesar de que el coeficiente de determinación fue relativamente alto ($r^2 = 0.990$).

Los resultados del escenario 3 (**Figura 6c**) muestran una función distribución de probabilidad aproximadamente uniforme en relación con el costo total de la instalación con una media de \$ 48, 249.82 MXN y una mediana de \$ 48, 258.27 MXN. Los percentiles del 5% y 95% indican que el costo mínimo con un 95% de confianza es de \$ 41,597.83 MXN y el costo máximo con un 95% de confianza es de \$ 54,927.82 MXN, respectivamente. Con respecto a la forma de la distribución de probabilidad, la prueba de Kolmogorov-Smirnov determinó que no puede

considerarse como una distribución normal ($K-S = 0.1478$, nivel de significancia de 0.05 y $r^2 = 0.9551$).

Por su parte, los resultados del escenario 4 (**Figura 6d**) muestran una función distribución de probabilidad ligeramente asimétrica en relación con el costo total de la instalación con una media de \$ 46, 671.12 MXN y una mediana de \$ 46, 694.73 MXN. Los percentiles del 5% y 95% indican que el costo mínimo con un 95% de confianza es de \$ 41, 015.55 MXN y el costo máximo con un 95% de confianza es de \$ 52, 293.32 MXN, respectivamente. Con respecto a la forma de la distribución de probabilidad, la prueba de Kolmogorov-Smirnov determinó que no puede considerarse como una distribución normal ($K-S = 0.1836$, nivel de significancia de 0.05) a pesar de que el coeficiente de determinación fue relativamente alto ($r^2 = 0.9911$). Debe notarse que, considerando el valor máximo con un 95% de confianza, el costo de instalación del techo verde de acuerdo con este escenario es de \$830 MXN/m² (\$ 43 USD/m²). Este valor es considerablemente bajo en comparación con costos publicados en literatura. Por ejemplo, los costos en Alemania varían entre \$86 y \$162 USD (Scholz-Barth, 2001). Esto puede deberse a que los honorarios en México son muy bajos, por lo que los costos de mano de obra resultan menores.

Los resultados del escenario 5 (**Figura 6e**) muestran el efecto de seleccionar funciones distribución beta en los costos unitarios de algunos insumos. Visiblemente, la función distribución de probabilidad del costo total de la instalación no es gaussiana. La media es \$ 51, 455.59 MXN y la mediana es \$ 51, 719.92 MXN. Los percentiles del 5% y 95% indican que el costo mínimo con un 95% de confianza es de \$ 47, 269.97 MXN y el costo máximo con un 95% de confianza es de \$ 54, 643.16 MXN, respectivamente. Con respecto a la forma de la distribución de probabilidad, la prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors determinó que no puede considerarse como una distribución normal ($K-S = 0.1709$, nivel de significancia de 0.05). Por lo anterior, se ajustaron los datos a una distribución beta

obteniéndose valores de $\alpha = 6.116$ y $\beta = 3.443$. Con estos parámetros, el coeficiente de determinación es ($r^2 = 0.9906$). Si se considera el costo máximo con un 95% de confianza, el costo de instalación del techo verde para este escenario es de \$ 867 MXN/m² (\$ 45 USD/m²). Como en el escenario 5, este costo es claramente inferior a los costos reportados en países desarrollados.

Similar al escenario 5, los resultados del escenario 6 (**Figura 6f**) muestran una función distribución de probabilidad tipo beta debido a la selección de esta distribución en los materiales de impermeabilización mencionados anteriormente. La media obtenida es de \$ 42, 772.85 MXN y la mediana de \$ 43, 028.08 MXN. Los percentiles del 5% y 95% indican que el costo mínimo con un 95% de confianza es de \$ 38, 664.00 MXN y el costo máximo con un 95% de confianza es de \$ 45, 963.04 MXN, respectivamente. Con respecto a la forma de la distribución de probabilidad, la prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors determinó que no puede considerarse como una distribución normal (K-S = 0.2001, nivel de significancia de 0.05). Por lo anterior, se ajustaron los datos a una distribución beta obteniéndose valores de $\alpha = 6.012$ y $\beta = 3.224$. Con estos parámetros, el coeficiente de determinación es ($r^2 = 0.9930$).

4.5. Costos de mano de obra directa de la instalación del techo verde

Los resultados obtenidos de la simulación realizada por la herramienta de cómputo obtuvieron una variación mínima del -20% y máxima del +20% respecto a la media del Subtotal de mano de obra directa debido a la desviación típica incorporada del 20% (**Tabla 16**). Esta desviación fue propuesta debido a las variaciones en los costos obtenidos en campo de diferentes contratistas y a su vez, útil para el análisis del proyecto. Los seis escenarios simulados mostraron las proporciones más bajas en la **Etap 1** y las más altas en la **Etap 4** de las medidas de tendencia central y de dispersión de los costos de mano de obra respecto al Subtotal de estos. Además, se observa que los costos se encuentran en mayor proporción en las medias de las

Etapas 4 y 5, estas suman el 51.59% respecto al Subtotal de la mano de obra directa (**Tabla 16**).

Tabla 16. Proporción de los costos de mano de obra directa en relación al Subtotal de mano de obra.

	Mano de Obra: Etapa 1	Mano de Obra: Etapa 2	Mano de Obra: Etapa 3	Mano de Obra: Etapa 4	Mano de Obra: Etapa 5	Mano de Obra: Etapa 6
Mínimo	7.22%	7.28%	10.04%	21.06%	20.98%	15.06%
Máximo	11.39%	12.07%	15.94%	30.44%	30.80%	22.88%
Media	9.20%	9.37%	12.90%	25.81%	25.78%	18.77%
Desviación Estándar	0.68%	0.69%	0.89%	1.52%	1.51%	1.23%

Así también, se encontró que la proporción de las medias de los costos de mano de obra directa respecto al costo total de la instalación representan, en suma, el 18.09%, pero poco más de la mitad (9.16%) corresponde a las **Etapas 4 y 5**. Esto se debe a que en estas etapas se requiere a diferencia de las demás, un obrero y un día adicional para concluir las actividades, por lo que también se encontraron las proporciones más altas en sus desviaciones estándar (**Tabla 17**).

Tabla 17. Proporción de los costos de mano de obra directa con relación al costo total de instalación.

	Mano de Obra: Etapa 1	Mano de Obra: Etapa 2	Mano de Obra: Etapa 3	Mano de Obra: Etapa 4	Mano de Obra: Etapa 5	Mano de Obra: Etapa 6
Mínimo	1.18%	1.19%	1.65%	3.35%	3.21%	2.39%
Máximo	2.37%	2.37%	3.16%	6.40%	6.34%	4.59%
Media	1.65%	1.66%	2.29%	4.58%	4.58%	3.33%
Desviación Estándar	0.17%	0.17%	0.23%	0.45%	0.45%	0.33%

A continuación, se presenta la media y la desviación estándar de los costos totales de la mano de obra directa de la instalación del techo verde extensivo de cada escenario simulado (**Tabla 18**). El escenario 1 presenta media y la desviación estándar más baja del costo total de la mano de obra directa, esto se debe a que no se generaron costos en la **Etapa 1** por la selección de un tipo de "Techo Nuevo" el cual no requiere del acondicionamiento del techo (lavado y desinfección de losa). El escenario 3 presenta la media y la desviación estándar más alta del costo total de la mano de obra directa, estos valores pueden inferirse a la función de probabilidad uniforme utilizada para

este escenario, donde todos los costos dentro del rango establecido tienen la misma probabilidad de ocurrir, obteniendo como resultado frecuencias más altas. Asimismo, uno de los criterios establecidos para el escenario 6 fue la eliminación de los costos de mano de obra directa, por lo que no se hacen presentes en la **Tabla 18**.

Tabla 18. Media y desviación estándar de los costos de mano de obra directa de la instalación del techo verde extensivo.

Escenarios	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Escenario 1	\$ 7,884.52	\$ 259.16	3%
Escenario 2	\$ 8,686.29	\$ 270.24	3%
Escenario 3	\$ 8,702.65	\$ 319.55	4%
Escenario 4	\$ 8,675.87	\$ 267.07	3%
Escenario 5	\$ 8,690.26	\$ 256.65	3%
Escenario 6	n.a*	n.a*	n.a*

n.a*= No aplica.

4.6. Costos de los insumos de la instalación del techo verde

Los seis escenarios simulados mostraron las proporciones más bajas en la **Etapa 1** y las más altas en la **Etapa 3** de las medidas de tendencia central y de dispersión de los costos de los insumos respecto al subtotal de los mismos. Además, se observa que los costos se encuentran en mayor proporción en las medias de las **Etapas 3 y 4**, estas suman el 84.57% respecto al subtotal de los insumos (**Tabla 19**).

Tabla 19. Proporción de los costos de los insumos en relación al subtotal de insumos.

	Insumos: Etapa 1	Insumos: Etapa 2	Insumos: Etapa 3	Insumos: Etapa 4	Insumos: Etapa 5	Insumos: Etapa 6
Mínimo	0.57%	2.62%	37.93%	24.95%	6.51%	1.27%
Máximo	1.15%	6.89%	60.46%	44.84%	10.64%	3.60%
Media	0.81%	4.41%	50.72%	33.85%	8.14%	2.20%
Desviación Estándar	0.09%	0.76%	3.99%	3.30%	0.71%	0.39%

Así también, se encontró que la proporción de las medias de los costos de los insumos representan el 85.31% respecto al costo total de la instalación (**Tabla 20**), pero más de la mitad (72.14%) corresponde a las **Etapas 3 y 4**. Esto se debe a los criterios establecidos para la simulación del escenario 5 del **Apartado 3.6.2**. Debido a esto, se

infiere un incremento en el costo de estos materiales en el tiempo, por lo que también se encontraron las proporciones más altas en sus desviaciones estándar.

Tabla 20. Proporción de los costos de insumos en relación al costo total de instalación.

	Insumos: Etapa 1	Insumos: Etapa 2	Insumos: Etapa 3	Insumos: Etapa 4	Insumos: Etapa 5	Insumos: Etapa 6
Mínimo	0.49%	2.26%	31.84%	21.47%	5.64%	1.10%
Máximo	0.93%	5.67%	52.10%	37.68%	8.67%	2.93%
Media	0.68%	3.74%	43.31%	28.83%	6.88%	1.87%
Desviación Estándar	0.07%	0.62%	3.71%	2.66%	0.50%	0.32%

A continuación se presenta la media y la desviación estándar de los costos totales de los insumos de la instalación del techo verde extensivo de cada escenario simulado (**Tabla 21**).

Tabla 21. Media y desviación estándar de los costos de la instalación del techo verde extensivo.

Escenarios	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
Escenario 1	\$ 38,992.27	\$ 3,414.86	9%
Escenario 2	\$ 39,420.74	\$ 3,415.29	9%
Escenario 3	\$ 39,547.17	\$ 4,103.37	10%
Escenario 4	\$ 37,988.38	\$ 3,415.08	9%
Escenario 5	\$ 42,772.85	\$ 2,230.86	5%
Escenario 6	\$ 42,772.85	\$ 2,230.86	5%

El escenario 3 presenta la desviación estándar más alta respecto al costo total de los insumos, este valor puede inferirse de la misma manera que el costo de mano de obra directa de la instalación (**Tabla 18**) a la probabilidad tipo uniforme utilizada para este escenario, donde todos los costos dentro del rango establecido tienen la misma probabilidad de ocurrir, obteniendo como resultado frecuencias más altas.

El escenario 4 presenta la media más baja del costo total de los insumos debido a que solo se seleccionaron los costos de los materiales propios del techo verde, excluyendo las herramientas que, por lo general, trabajador posee, los criterios establecidos para la simulación del escenario 4 se pueden ver en el **Apartado 3.6.2**.

Los escenarios 5 y 6 presentan medias más altas y las desviaciones estándar más bajas del costo total de los insumos debido a la selección del tipo de función de distribución tipo beta en que se simularon los costos del impermeabilizante prefabricado SBS de la **Etapa 3** y la lámina nodular de polietileno para drenaje anti-raíz de la **Etapa 4** considerando un coeficiente de variación del 8% de sus costos.

4.7. El ahorro energético como el principal beneficio del techo verde

Se utilizaron los datos obtenidos de la simulación del consumo energético realizada por (Fuentes Velasco, 2014) para estimar el costo que representaría la edificación *Tipo A* del *Subtipo A5* (Ver Tablas 22 y 23).

Tabla 22. Cálculo del costo por consumo eléctrico anual en edificación *Tipo A5 C.R.*

Inicio del bimestre	Final del bimestre	kWh bimestral	Consumo (kWh)	Tarifa (\$)	Subtotal (\$)	Total bimestral (\$)	Total + IVA (\$)	Fecha de facturación
01-Ene-18	01-Mar-18	1,385	150	0.793	118.95	3,117.92	3,616.79	Feb-18
			250	0.956	239.00			
			985	2.802	2,759.97			
01-Mar-18	01-May-18	2,507	350	0.697	243.95	4,696.06	5,447.43	Abr-18
			450	0.822	369.90			
			400	1.05	420.00			
			1,307	2.802	3,662.21			
01-May-18	01-Jul-18	2,759	350	0.697	243.95	5,402.17	6,266.52	Jun-18
			450	0.822	369.90			
			400	1.05	420.00			
			1,559	2.802	4,368.32			
01-Jul-18	01-Sep-18	2,372	350	0.697	243.95	4,317.79	5,008.64	Ago-18
			450	0.822	369.90			
			400	1.05	420.00			
			1,172	2.802	3,283.94			
01-Sep-18	01-Nov-18	1,771	150	0.793	118.95	4,199.49	4,871.41	Oct-18
			250	0.956	239.00			
			1,371	2.802	3,841.54			
01-Nov-18	01-Ene-19	1,199	150	0.793	118.95	2,596.75	3,012.23	Dic-18
			250	0.956	239.00			
			799	2.802	2,238.80			
Total Anual		11,993				24,330.18	28,223.02	

Tabla 23. Cálculo del costo por consumo eléctrico anual en edificación *Tipo A5 G.R.*

Inicio del bimestre	Final del bimestre	kWh bimestral	Consumo (kWh)	Tarifa (\$)	Subtotal (\$)	Total bimestral (\$)	Total + IVA (\$)	Fecha de facturación
01-ene-18	01-mar-18	1, 225	150	0.793	118.95	2, 669.60	3, 096.74	feb-18
			250	0.956	239			
			825	2.802	2, 311.65			
01-mar-18	01-may-18	2, 111	350	0.697	243.95	3, 586.47	4, 160.31	abr-18
			450	0.822	369.9			
			400	1.05	420			
			911	2.802	2, 552.62			
01-may-18	01-jul-18	2, 310	350	0.697	243.95	4, 144.07	4, 807.12	jun-18
			450	0.822	369.9			
			400	1.05	420			
			1110	2.802	3, 110.22			
01-jul-18	01-sep-18	2, 008	350	0.697	243.95	3, 297.87	3, 825.52	ago-18
			450	0.822	369.9			
			400	1.05	420			
			808	2.802	2, 264.02			
01-sep-18	01-nov-18	1, 533	150	0.793	118.95	3, 532.62	4, 097.83	oct-18
			250	0.956	239			
			1133	2.802	3, 174.66			
01-nov-18	01-ene-19	1, 084	150	0.793	118.95	2, 274.52	2, 638.44	dic-18
			250	0.956	239			
			684	2.802	1, 916.57			
Total Anual		10, 271				19, 505.14	22, 625.96	

En referencia al precio de la energía eléctrica estimada para los tipos de edificaciones analizadas, se registró el mayor ahorro económico en el caso *A5 Green Roof (GR)* (**Tabla 24**) con un 19.83% respecto al caso *A5 Conventional Roof (CR)*.

Tabla 24. Costo anual y ahorro económico con techo convencional y techo verde de la edificación.

Edificación	Costo Anual (\$ MXN)		Ahorro Económico (\$ MXN)	Ahorro Económico (%)
	C.R.	G.R.		
A5	28, 223.02	22, 625.96	5, 597.06	19.83

Además, si se considera a la potencia eléctrica, la instalación del techo verde permite ahorrar 1, 722 kW/año, un valor claramente mayor que el ahorro energético reportado para países en otras latitudes, el cual, en el mejor de los casos, no excede de 130.4 kWh/año (Ulubeyli & Arslan, 2017).

4.8. Otros beneficios del techo verde

Además del ahorro energético asociado a la instalación de un techo verde, se pueden reconocer dos beneficios adicionales más o menos extendidos en la normatividad nacional e internacional: *i*) un descuento en el impuesto predial, y *ii*) un bono por la captura de carbono. Otros beneficios ambientales aún no han sido claramente reconocidos, tales como la captación pluvial o la disminución del ruido, por lo que no se contemplan en este análisis.

4.8.1. Impuesto predial

El impuesto predial es un tributo con el cual se grava una propiedad o posesión inmobiliaria. Es una contribución que hacen los ciudadanos que son dueños de un inmueble, ya sea vivienda, despacho, oficina, edificio o local comercial. Este impuesto existe en muchos países del mundo y se sustenta en la idea de que todos aquellos que son propietarios de un bien inmueble, deben aportar una cuota anual al Estado.

En nuestro país, existen algunas ciudades y estados que ofrecen descuentos en el impuesto predial de viviendas cuando cuentan con un techo verde instalado en ellas. En la Ciudad de México, los beneficios positivos generados por la reducción del impuesto en el predial los otorga la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) en coordinación con la Secretaría de Finanzas. Un beneficio fiscal del 10% en la reducción del impuesto predial a las personas físicas que acrediten ser propietarias de inmuebles destinados a uso habitacional y que instalen voluntariamente un sistema de naturación de azoteas o azotea verde en los techos de sus viviendas y cumpla con lo dispuesto en la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013 RNAT-2007 emitida por la SEDEMA (Código Fiscal de la Ciudad de México, 2017).

Por su parte, en el estado de Nuevo León, el artículo 21 bis 12-C (Reformado el 29 de diciembre de 2017) de la Ley de Hacienda para los Municipios menciona que los Municipios, en el ámbito de sus posibilidades, establecerán programas de recaudación

fiscal del impuesto predial con la finalidad de fomentar la cultura del medio ambiente, mediante mecanismos de reciclaje o reúso de los materiales que estime la autoridad. Las personas físicas que acrediten ser propietarias de inmuebles de uso habitacional tendrán derecho a la reducción del impuesto predial de hasta 10% a los que realicen la naturación del techo de su vivienda, siempre y cuando el sistema de naturación ocupe tres cuartas partes del total de la superficie del techo y cumpla con lo dispuesto en el reglamento municipal correspondiente. (H. Congreso del Estado de Nuevo León, 2017).

En Jalisco, el Congreso del Estado adicionó el artículo 100-bis a la Ley de Hacienda Municipal, el cual se refiere a la naturación del techo de una propiedad, con la posibilidad de obtener una reducción del 20% en el impuesto predial (H. Congreso del Estado de Jalisco, 2017).

Finalmente, el Ayuntamiento de Mérida autorizó recientemente el “Programa de Estímulo a las Acciones ante el Cambio Climático - Paneles Solares” y “Programa de Estímulo a las Acciones ante el Cambio Climático-Azoteas Verdes”, cuyos fines consisten en mitigar los efectos de la urbanización de forma parcial; dichos programas están dirigidos a los propietarios que acrediten el uso habitacional en sus viviendas y que tengan instalados en ellas paneles solares o azoteas verdes, según sea el caso. Los propietarios referidos en el párrafo anterior podrán acceder al subsidio 15% sobre el monto principal del impuesto predial, respecto al pago total anual de dicho impuesto (Ayuntamiento de Mérida, 2019).

Como resultado de lo anterior, en este estudio se propone emplear un descuento del 10% en el impuesto predial de la edificación como beneficio fiscal al acreditar un techo verde en el inmueble. Considerando la normatividad de la Ciudad de México, el impuesto predial se calcula tomando como base el valor catastral del inmueble, calculando los valores unitarios del suelo y la construcción y multiplicando a estos por la superficie de la edificación (Secretaría de Administración y Finanzas de la Ciudad de México, 2018). Debido a que la edificación de esta investigación no cuenta con área de

estudio específica, salvo las condiciones de trópico húmedo propuestas para la instalación del techo verde extensivo, no se le puede asignar un valor real a la edificación. De la misma manera, las tasas de pago del impuesto del predial varían de un Estado a otro con base a sus Leyes de Hacienda locales. Dicho lo anterior, se presupuestó el costo del inmueble con un valor de \$ 1, 000,000.00 MXN y se estableció una cuota fija de \$ 1, 000.00 MXN anuales por pagos de impuesto al predial. Como resultado, un descuento del 10% al impuesto predial implicaría un pequeño ahorro de \$ 100 MXN anuales.

4.8.2. Captura de carbono

Asimismo, se incorporó el concepto de captura de CO₂ con el objetivo de obtener un beneficio positivo a través de los bonos de carbono. De acuerdo a los estudios realizados por (Brito de Dios, Hernández Barajas, & Magaña Villegas, 2018), la tasa máxima diaria de captura de carbono por medio del follaje durante los meses de septiembre, noviembre, diciembre y febrero con un 95% de confianza dieron como resultado una media de 101.85 (g C/m²) con las especies vegetales *Tradescantia spathacea*, *Tradescantia pallida* y *Cyperus ligularis*.

Debido a la falta de información acerca de la captura de CO₂ en el sustrato y en la biomasa subterránea de la vegetación bajo estudio, se propuso determinar los valores de estos mediante una proporción directa con base a los valores de las medias obtenidas del estudio realizado por (Getter *et al.*, 2009), sobre la cuantificación del potencial de almacenamiento de carbono en techos verdes extensivos compuestos principalmente por especies de *Sedum*, y bajas profundidades del sustrato y características representativas de techos verdes extensivos en los Estados Unidos. En el estudio realizado en East Lansing, Michigan, se observó que el almacenamiento de carbono por la vegetación (tallos y hojas) obtuvo una media de 168 g C/m², la biomasa subterránea (raíces) obtuvo una media de 107 g C/m² y el contenido de carbono en el

sustrato resultó con una media de 100 g C/m², siendo un total de 375 g C/m² del techo verde extensivo en un periodo de 2 años.

A continuación se presenta la equivalencia de los gramos de carbono a CO₂ capturado anualmente de acuerdo a los datos obtenidos por (Getter, *et al.*, 2009):

Tabla 25. Potencial de almacenamiento de C y CO₂ del techo verde extensivo (Getter, *et al.*, 2009).

Planta	Biomasa subterránea	Sustrato	Total	Unidad
84.00	53.50	50.00	187.50	g C/m ²
22.93	14.60	13.65	51.17	g CO ₂ /m ²
44.80	28.53	26.67	100.00	%

Empleando la misma proporción directa para cada componente con el valor obtenido de 101.85 g C/m² por (Brito de Dios, *et al.*, 2018), obtenemos los siguientes datos:

Tabla 26. Potencial de almacenamiento de C y CO₂ del techo verde extensivo bajo estudio.

Planta	Biomasa Subterránea	Sustrato	Total	Unidad
101.85	64.87	60.63	227.34	g C/m ²
27.80	17.70	16.55	62.05	g CO ₂ /m ²
44.80	28.53	26.67	100.00	%

Con esta proporción definida a cada componente, se espera que el techo verde extensivo propuesto para este estudio tenga una captura aproximada de 0.052 Ton CO₂/año.

Posteriormente, es importante definir una tarifa a los bonos de carbono. En 2017, la Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), indicó que un bono de carbono representa una tonelada de CO₂ equivalente y que en países desarrollados el precio por tonelada se negocia hasta en \$ 51.00 USD, mientras que en países en desarrollo, como en China, puede alcanzar \$ 19.00 USD (El Economista, 2017).

Por otra parte, en 2018 el gobierno canadiense anunció su intención de aumentar el precio del carbono desde \$10 CAD (The Guardian, 2016) a \$ 50 CAD (aproximadamente \$ 38.00 USD) por tonelada en los próximos 10 años. A largo plazo, es probable que sea superior a \$ 50.00 CAD. Asimismo, las oficinas contables de las corporaciones privadas a nivel mundial incluyen un impuesto máximo de \$ 50.00 USD por tonelada de carbono emitido. De la misma manera, las compañías petroleras han incorporado recientemente un precio de carbono de \$ 60.00 USD por tonelada en su contabilidad social (Auld & Wright, 2018).

Dicho lo anterior, para el análisis de costo-beneficio, se estableció una tarifa fija de \$ 38.00 USD por bono de carbono (\$ 725. 80 MXN considerando un tipo de cambio de \$ 19.10 MXN, a febrero de 2019) durante el tiempo de vida útil del techo verde, lo que representa un beneficio económico de \$ 745.49 MXN por concepto de captura de CO₂.

Existen muchos otros beneficios ambientales que pueden asociarse a la instalación de un techo verde y obtener incentivos económicos de ellos, un ejemplo es el Programa de reembolsos del condado de Montgomery, Maryland, el cual establece que los techos verdes extensivos calificados pueden obtener \$ 10.00 USD/ft² como reembolso de impuestos. Asimismo, el condado de Prince George, cuenta con un programa de reembolso de \$2, 000 USD como máximo para proyectos a nivel residencial con incentivos de \$ 10.00 USD/ft² (\$ 107.64 USD/m²) para techos verdes de al menos 28 m² de superficie. En Palo Alto, California, se otorgan incentivos de \$ 1.50 USD/ft² (\$ 16.15 USD/m²) por la instalación de un techo verde para minimizar la escorrentía de aguas pluviales. Los reembolsos están limitados a un máximo de \$ 1,000 USD por propiedad residencial unifamiliar y \$ 10,000 USD para propiedades residenciales comerciales / industriales y multifamiliares (Vegetal I. D., 2014).

4.9. Relación beneficio-costo del techo verde

Se establecieron como beneficios positivos el Valor Presente Neto (VPN) del ahorro energético, un descuento del impuesto en el predial y los bonos de Carbono equivalentes a la captura de CO₂ que genera la instalación del techo verde extensivo en un periodo de 40 años. El VPN es presentado en la **Tabla 27**.

Tabla 27. VPN de los beneficios positivos del ciclo de vida de un techo verde extensivo (\$/MXN).

Ahorro Energético	Impuesto Predial	Captura de CO ₂	Total
\$ 110,555.34	\$ 1,975.24	\$ 745.49	\$ 113,276.06

El ahorro energético que ofrece un techo verde extensivo con las características descritas en este estudio es de \$ 110,555.34 MXN a lo largo de la vida útil del proyecto, esto comprende el 97.60% del total de los beneficios económicos positivos examinados.

A continuación, se presenta en la **Tabla 28** el VPN de cada etapa propuesta del ciclo de vida del proyecto del techo verde extensivo con los costos de instalación del escenario más probable de instalación (escenario 4) y los costos de instalación del peor escenario (escenario 5), respectivamente.

Tabla 28. Valor presente del beneficio negativo y los costos del ciclo de vida de un techo verde extensivo.

Escenarios	Instalación	Mantenimiento	Reemplazo de Insumos	Desmantelamiento y Disposición Final de los Residuos	VPN
Escenario 4	\$ 46,671.12	\$ 102,712.45 *	\$ 21,050.44	\$ 1,700.00	\$ 172,134.01
Escenario 5	\$ 51,455.59				\$ 176,918.48

* Costo que considera el pago de un jardinero en \$350.00 MXN mensualmente por 40 años.

Los costos generados en las etapas de instalación y desmantelamiento, y disposición final de los residuos solo se realizarán una vez durante el tiempo de vida útil del proyecto, por lo que pueden considerarse como inversión inicial del mismo. De esta

manera, los costos del escenario 4 representan el 28.10% y para el escenario 5 representan el 30.05% respecto al costo total de la vida útil del proyecto de cada uno de ellos.

Un estudio de (Mahdiyari *et al.*, 2016) compara los costos de instalación, operación y mantenimiento de un techo verde intensivo y uno extensivo, con los beneficios del ahorro energético, el aumento en el valor de la propiedad y el efecto acústico para determinar el VPN y un periodo de reembolso utilizando el método de la simulación Monte Carlo en un periodo de 50 años. Sus resultados muestran que el VPN del escenario más probable del proyecto de un techo verde extensivo es de \$ 173.00 USD/m² (aproximadamente \$ 3,304.30 MXN/m²).

Las actividades realizadas dentro de la etapa de mantenimiento definidas como beneficios negativos juegan un papel muy importante en los costos del ciclo de vida del proyecto, pues para el escenario 4 representan el 59.67% y para el escenario 5 representan el 58.06% respecto al costo total de la vida útil del proyecto de cada uno de ellos. Cabe señalar que los costos de mantenimiento corresponden al costo total del peor escenario económico de las actividades de jardinería, pues el costo de \$ 102,712.45 MXN se estimó con una frecuencia en el mantenimiento de una vez al mes durante los 40 años del tiempo de vida útil del proyecto.

La estimación de la relación beneficio-costos, de acuerdo con la Ec. (11), y con los valores definidos anteriormente se presentan en la **Tabla 29**. Los resultados de los dos escenarios propuestos presentan valores <1.0, por lo que el proyecto no es viable en términos económicos, esto es de esperarse pues se observa la gran diferencia que existe entre los costos generados frente a los ahorros que se reciben de este proyecto. Los costos de inversión de los dos escenarios propuestos están sobrepasados poco más del doble que los que se generan en la etapa de mantenimiento.

Tabla 29. Relación beneficio-costo del proyecto considerando dos escenarios.

Escenario 4 (Escenario más probable)		Escenario 5 (El peor escenario)	
Actividad	Monto (\$/MXN)	Actividad	Monto (\$/MXN)
Costos		Costos	
Instalación	46,671.12	Instalación	51,455.59
Desmantelamiento	1,700.00	Desmantelamiento	1,700.00
Subtotal	48,371.12	Subtotal	53,155.59
Mantenimiento	102,712.45	Mantenimiento	102,712.45
Reemplazo de Insumos	21,050.44	Reemplazo de Insumos	21,050.44
Total	172,134.01	Total	176,918.48
Beneficios		Beneficios	
Ahorro Energético	110,555.34	Ahorro Energético	110,555.34
Descuento del Impuesto Predial	1,975.24	Descuento del Impuesto Predial	1,975.24
Captura de CO ₂	745.49	Captura de CO ₂	745.49
Total	113,276.07	Total	113,276.07
Relación B/C	0.15	Relación B/C	0.14

El costo del mantenimiento depende en gran medida del tipo de vegetación utilizada. Los techos verdes extensivos son bien conocidos por las capas finas de sustrato y sus plantas pequeñas. Diversos autores como (Snodgrass & McIntyre, 2010) esperan que este tipo de techos verdes no tengan mantenimiento, pero recomiendan regularmente la fertilización.

Debido a esto, se propuso una variabilidad de los costos de mano de obra indirecta en las actividades de jardinería con costos de \$300.00 y \$ 350.00 MXN por cada jornal con una frecuencia de tres, seis, nueve y doce veces al año. Asimismo, se propone que el propietario que habitará la edificación sea él mismo el que realice las actividades de jardinería, por lo que solo se generará anualmente un costo indirecto en el insumo del fertilizante en la etapa de mantenimiento, pero no en costos de mano de obra indirecta.

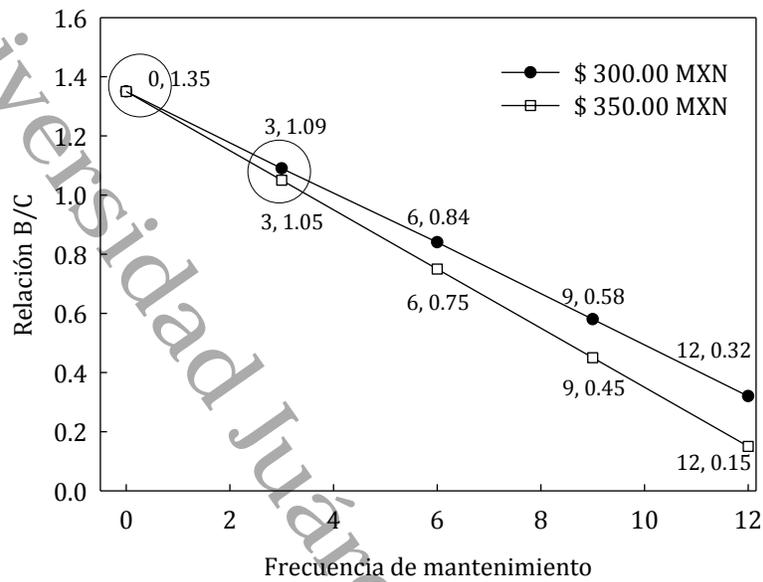


Figura 7. Variabilidad de la relación B/C con los costos de las actividades de mantenimiento con distintas frecuencias al año en el escenario 4. Cada par de datos alrededor de cada punto corresponde a la frecuencia de mantenimiento y a la relación B/C, respectivamente.

Si el propietario decide no realizar inversión para el mantenimiento de su techo verde, más que la aplicación anual de un fertilizante para la vegetación, la relación B/C será de 1.35 para el escenario 4 (**Figura 7**), lo que es equivalente a un ahorro de \$ 24, 102.11 MXN en el tiempo de vida útil del proyecto, expresado como VPN. Una frecuencia de tres veces al año en el mantenimiento del techo verde extensivo con costos de mano de obra indirecta de \$ 300.00 y \$ 350.00 MXN por actividades de jardinería reflejan una relación B/C de 1.09 y 1.05, que resulta en un ahorro económico de \$6, 324.95 y \$3, 362.10 MXN respectivamente.

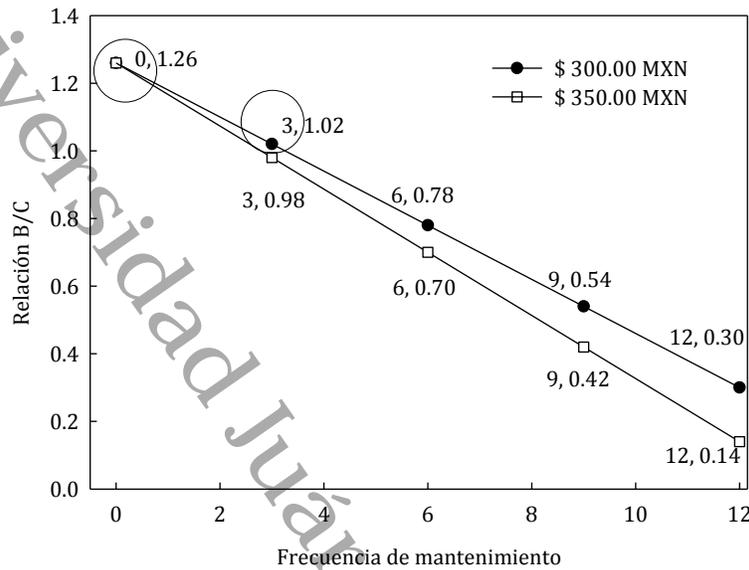


Figura 8. Variabilidad de la relación B/C con los costos de las actividades de mantenimiento con distintas frecuencias al año en el escenario 5. Cada par de datos alrededor de cada punto corresponde a la frecuencia de mantenimiento y a la relación B/C, respectivamente.

Nuevamente, si el propietario decide realizar el mantenimiento de su techo verde, con una aplicación anual de un fertilizante para la vegetación, la relación B/C será económicamente viable y beneficiosa con una relación de 1.26 para el escenario 5 (**Figura 8**), lo que es equivalente a un ahorro de \$ 19, 317.64 MXN en el tiempo de vida útil del proyecto. Así también, el escenario 5 demuestra que una frecuencia de tres veces al año en el mantenimiento del techo verde extensivo con costos de mano de obra indirecta de \$ 300.00 MXN por actividades de jardinería resulta con una relación B/C de 1.02, que resulta en un ahorro económico de \$ 1, 540.48 MXN sin embargo, un costo de mano de obra indirecta por \$ 350.00 MXN, la relación resulta de 0.98, lo que implica un costo de \$1, 422.37 MXN a lo largo de la vida útil del proyecto.

Los beneficios económicos y ambientales de los techos verdes dependen de su eficiencia. En consecuencia, el mantenimiento de los techos verdes es importante para garantizar sus impactos positivos. (Bianchini & Hewage, 2012), señalan que el costo anual de operación y mantenimiento de un techo verde extensivo en Canadá oscilaría

entre \$ 0.65 USD/m² (\$ 12.41 MXN/m²) y \$ 13.46 USD/m² (\$ 257.08 MXN/m²) asumiendo una distribución uniforme para modelar la variabilidad del costo. (Claus & Rousseau, 2012), mencionan un costo de mantenimiento de \$ 1 EUR/m² (\$ 21.93 MXN/m²) en Bélgica.

Para analizar y apoyar la viabilidad económica de una inversión, hay varios métodos matemáticos en la literatura. Estos métodos empleados pueden describirse como un medio para auditar las consecuencias financieras de una decisión. Existen varios esfuerzos de investigación que concluyen que los techos verdes extensivos son una opción económicamente viable (Ver **Tabla 30**).

Tabla 30. Otros estudios económicos en techos verdes extensivos. Fuente: (Ulubeyli & Arslan, 2017)

Autores	País	Método(s) de Viabilidad Usado(s)				Costos Iniciales (\$USD/m ²)	¿Es Viable?
		VPN (\$USD/m ²)	Razón B/C	Tasa Interna de Retorno (%)	Periodo de Reembolso (Años)		
(Wong, Tay, Wong, Ong, & Sia, 2003)	Singapur	115.9	n.a.	8	20	89.9	Sí
(Clark, Adriaens, & Talbot, 2008)	USA	234.2	n.a.	n.a.	n.a.	232.0	Sí
(Blackhurst, Hendrickson, & Matthews, 2010)	USA	n.a.	0.023	n.a.	n.a.	97.0	No
(Jim & Tsang, 2011)	Hong Kong	426.3	n.a.	n.a.	n.a.	150.0	Sí
(Bianchini & Hewage, 2012)	USA	291	n.a.	n.a.	n.a.	130.0 - 165.0	Sí
(Claus & Rousseau, 2012)	Bélgica	11.4	n.a.	n.a.	n.a.	35.3	Sí
(Chan & Chow, 2013)	Hong Kong	346.5	n.a.	n.a.	n.a.	68.0	Sí
Este estudio *	México	74.1-78.1	1.35-1.26	n.a.	n.a.	40.2 - 44.2	Sí

n.a. = no aplica. *El intervalo de valores de este estudio corresponden al escenario más probable y al peor escenario, respectivamente.

Es importante señalar que el propietario debe mantener el capital del mantenimiento y del reemplazo de materiales en una cuenta de inversión durante el tiempo de vida útil del proyecto, debido a que los precios crecen anualmente con la inflación, pero las inversiones crecen con las tasas de rendimiento otorgadas por los CETES directo en México. Al respecto, y de acuerdo con el escenario más probable y al peor escenario, los costos de capital (inversión inicial) estimados en este estudio son de \$ 767.80 MXN/m² a \$ 843.74 MXN/m² (aproximadamente de \$ 40.20 USD/ m² a

\$ 44.17 USD/m²) respectivamente. Por su parte, los costos de mantenimiento propuestos para este proyecto sin aplicación del fertilizante corresponden a un equivalente de \$ 4.76 MXN/m² a \$ 5.55 MXN/m² en el año cero.

Se puede observar que los costos de instalación y mantenimiento resultan claramente bajos en comparación a otras investigaciones (**Tabla 30**), esto se debe a que los costos de mano de obra en México son sumamente bajos en comparación a países desarrollados, lo que abarata la instalación del techo verde, a pesar de que algunos materiales de instalación son importados (lámina nodular drenante, prefabricado SBS) lo que incrementa su costo por aranceles y costos de envío.

5. CONCLUSIONES

En esta investigación se determinó la relación beneficio-costos de un techo verde de tipo extensivo sobre edificaciones urbanas en regiones de clima tropical húmedo.

Con respecto al análisis de costos unitarios, la etapa de instalación del techo verde contiene la mayor parte de los costos con incertidumbre, por lo que fueron representados como funciones de probabilidad uniforme, normal gaussiana y beta.

El desarrollo de una herramienta de cómputo creada con *Visual Basic para Aplicaciones* (VBA) de Microsoft Excel compuesta por un formulario y un módulo, facilitó la integración de los costos de instalación de los materiales, así como de la mano de obra directa con el método de simulación estocástica Monte Carlo. La herramienta permitió la simulación de 6 escenarios de costos de instalación.

Se determinó la relación B/C del proyecto durante el tiempo de vida útil, con la propuesta de los costos de instalación del escenario más probable y un peor escenario, considerando dos costos de la jornada de mantenimiento y varias tareas de mantenimiento anuales.

Los resultados de este estudio determinan que un techo verde extensivo a lo largo de su vida útil (40 años) en el escenario más probable, puede ser económicamente viable si los ocupantes de la vivienda o edificación son los responsables del mantenimiento del techo verde, pues esta actividad genera el mayor costo, expresado como VPN. Asimismo, se obtiene un beneficio si solo se contrata a un jardinero tres veces al año con pago de honorarios de \$ 300.00 MXN a \$ 350.00 MXN, por jornada.

Igualmente, la relación B/C es económicamente viable considerando los costos de instalación del peor escenario, si, y solo si los ocupantes realizan las actividades de

mantenimiento y/o si se costean las actividades de mantenimiento con una frecuencia de tres veces al año con un costo de jornal de \$ 300.00 MXN.

En conclusión, la instalación de techos verdes sería un negocio aún más atractivo si las leyes hacendarias locales, estatales y federales otorguen mayores beneficios a las tecnologías verdes que favorezcan a los inversionistas. Convendría que los gobiernos promovieran la construcción de techos verdes reduciendo impuestos y/o subsidiando parcialmente los costos de mantenimiento. Estos incentivos mejorarían la rentabilidad de los techos verdes, además persuadir su construcción en edificios nuevos y existentes. Asimismo, es importante considerar que existen otros beneficios ambientales a los que se podría atribuir un valor monetario que incrementarían los incentivos para instalar techos verdes, tales como la captación y el manejo de aguas pluviales, la reducción del riesgo de inundación, el control de la contaminación del aire, la mitigación del efecto de la isla de calor, entre otros; sin embargo, es necesario consolidar estos beneficios mediante la investigación científica que impulse a los gobiernos a la implementación de políticas de exención o reducción de impuestos para los propietarios de techos verdes.

Los techos verdes deben considerarse como parte de un conjunto de prácticas de construcción respetuosas con el medio ambiente por su aporte indiscutible a la sustentabilidad ambiental, por lo que deben considerarse sistemas de construcción económicamente viables. La viabilidad económica de cada elemento posible es importante para aumentar el valor del mercado de las tecnologías verdes. A medida que aumenta la urbanización, es fundamental encontrar un equilibrio entre los requisitos de desarrollo humano y las preocupaciones ambientales.

6. REFERENCIAS

- H. Congreso del Estado de Jalisco. (26 de Julio de 2017). *Ley de Hacienda Municipal*. Recuperado el 17 de Febrero de 2019, de http://congresoweb.congreso.jalisco.gob.mx/infolej/agendakioskos/documentos/sistema_integral/estados/R_24012.pdf
- Aguaza, B. O. (2012). Análisis Coste-Beneficio. *eXtoikos*, 147-149.
- Akbari, H. (2003). Measured energy savings from the application of reflective roofs in two small non-residential buildings. *Energy*, 28, 953-967.
- Auld, D., & Wright, J. (2018). Carbon Sequestering and Green Roof Technology: A Benefit Cost Analysis. *Macrothink Institute, Environmental Management and Sustainable Development*, 7(1), 85-92.
- Ayuntamiento de Mérida. (2019). *Programa de Estímulo a las Acciones ante el Cambio Climático*. Recuperado el 18 de Febrero de 2019, de http://www.merida.gob.mx/sustentable/panel_solar.php
- Badii, M., & Castillo, J. (Marzo de 2009). Distribuciones probabilísticas de uso común. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 4(1), 149-178.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 411-428.
- Bianchini, F., & Hewage, K. (2012). Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. *Building and Environment*, 152-162.
- Billo, E. J. (2007). *Excel for Scientists and Engineers: Numerical Methods*. United States of America.: Wiley and Sons, 1st ed.
- Blackhurst, M., Hendrickson, C., & Matthews, S. (2010). Cost-Effectiveness of Green Roofs. *Journal of Architectural Engineering*, 136-143.
- Blank, L. T., & Tarquin, A. J. (1999). *Ingeniería Económica* (Cuarta ed.). Texas: Mc Graw Hill.
- Bolívar Fuentes, R. C. (2015). Análisis del ciclo de vida de un techo ecológico para el ahorro energético en pequeños inmuebles bajo condiciones de clima tropical húmedo. (*tesis de maestría*).
- Brito de Dios, C. I., Hernández Barajas, J. R., & Magaña Villegas, E. (2018). Simulación estocástica de la captura de carbono en un techo verde en el trópico húmedo. *Séptimo*

- Encuentro de Jóvenes Investigadores en Evaluación y Tecnología Ambiental* (pág. 1). Villahermosa: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Carter, T. L., & Rasmussen, T. C. (2006). Hydrologic Behavior of Vegetated Roofs. *American Water Resources Association*, 1261-1274.
- Chan, A., & Chow, T. (2013). Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 182-198.
- Clark, C., Adriaens, P., & Talbot, F. B. (2008). Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits. *Environmental Science and Technology*, 2155-2161.
- Claus, K., & Rousseau, S. (2012). Public versus private incentives to invest in green roofs: A cost benefit analysis for Flanders. *Urban Forestry & Urban Greening*, 417-425.
- Código Fiscal de la Ciudad de México. (29 de Diciembre de 2017). *Fondo Mixto de Promoción Turística del Distrito Federal*. Recuperado el 13 de Febrero de 2019, de http://data.fmpt.cdmx.gob.mx/121.1/28.C%C3%93DIGO_FISCAL.pdf
- Comisión Federal de Electricidad. (2019). *Consulta tu tarifa*. Recuperado el 14 de Enero de 2019, de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/Tarifa1D.aspx>
- CONDUSEF. (27 de Enero de 2019). *Comisión Nacional para la Protección y Defensa de los Usuarios de Servicios Financieros*. Recuperado el 21 de Febrero de 2019, de <https://simulador.condusef.gob.mx/condusefahorro/>
- El Economista. (05 de Junio de 2017). *Se formalizará mercado de bonos de carbono*. Recuperado el 17 de Febrero de 2019, de <https://www.eleconomista.com.mx/mercados/Se-formalizara-mercado-de-bonos-de-carbono-20170605-0099.html>
- Fuentes Velasco, M. (2014). Estimación de ahorro energético asociado a la instalación de un techo verde para el aislamiento térmico de un edificio bajo condiciones de un clima tropical húmedo. Villahermosa, Tabasco, México.
- García Pech, E. I. (2010). Programa de cómputo para la determinación de mapas de iso-concentraciones a partir de modelos gaussianos de dispersión atmosférica en escenarios típicos de emisión. Villahermosa, Tabasco, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Getter L., K., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009). Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs. *Environ. Sci. Technol.*, 7564-7570.

- Guinée, J. G. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards*. Springer Science & Business Media.
- H. Congreso del Estado de Nuevo León. (29 de Diciembre de 2017). *Ley de hacienda para los municipios del Estado de Nuevo Leon*. Recuperado el 17 de Febrero de 2019, de http://www.hcnl.gob.mx/trabajo_legislativo/leyes/pdf/LEY%20DE%20HACIENDA%20PARA%20LOS%20MUNICIPIOS%20DEL%20ESTADO%20DE%20NUEVO%20LEON.pdf
- Heusinger, J., & Weber, S. (15 de Enero de 2017). Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements. *Science of The Total Environment*, 220-230.
- ISO 14040. (2006). Life cycle assessment – Principles and framework. *Environmental management*.
- Jim, C., & Peng, L. L. (2012). Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban Forestry & Urban Greening*, 73-85.
- Jim, C., & Tsang, S. (19 de junio de 2011). Ecological energetics of tropical intensive green roof. *Energy and Buildings*, 43, 2696-2704.
- Kosareo, L., & Ries, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 2606-2613.
- Kumar, R. (Noviembre de 2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40(11), 1505-1511.
- Mahdiyar, A., Tabatabaee, S., Sad, A. N., Mohandes, S. R., Abdullah, A., & Meynagh, M. M. (6 de octubre de 2016). Probabilistic private cost-benefit analysis for green roof installation: A Monte Carlo simulation approach. *Urban Forestry & Urban Greening*, 317-327.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., . . . Rowe., B. (2007). Green Roofs As Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions And Services. *BioScience*, 823-833.
- Peck, S., & Kuhn, M. (2001). *Design Guidelines For Green Roofs*. Toronto, Canada: Ontario Association of Architects.
- Peng, L. L. (2015). Economic evaluation of green-roof environmental benefits in the context of climate change: The case of Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 554-561.
- Peri, G., Traverso, M., Finkbeiner, M., & Rizzo, G. (2012). The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap. *Energy*, 406-414.

- Reshmina William, A. G. (2016). An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. *Ecological Engineering*, 1-9.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar energy*.
- Santiwipanont, T. (1999). *On Beta Distributions*. Department of Mathematics, University of Louisville, Louisville, Kentucky.
- Scholz-Barth, K. (2001). Green Roofs: Stormwater Management From the Top Down. *Environmental Design & Construction*.
- Secretaría de Administración y Finanzas de la Ciudad de México. (2018). *Como se determina el impuesto predial*. Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano; Comisiónj Nacional de Vivienda. (2017). *CEV*. México.
- Semaan, M., & Pearce, A. (2016). Assessment of the Gains and Benefits of Green Roofs in Different Climates. *Procedia Engineering*, 333-339.
- Snodgrass, E. C., & McIntyre, L. (2010). *The Green Roof Manual: a Professional Guide to Design, Installation, and Maintenance*. Portland, Oregon: Timber Press.
- The Guardian. (03 de Octubre de 2016). *Canada will tax carbon emissions to meet Paris climate agreement targets*. Recuperado el 15 de Febrero de 2019, de <https://www.theguardian.com/world/2016/oct/03/canada-carbon-emissions-tax-paris-climate-agreement>
- Theodosiou, T. (2009). Green Roofs in Buildings: Thermal and. *Advances in Building Energy Research*, 271-288.
- Toh, T. C., Ting, C., Ali, K. N., Aliagha, G. U., & Munir, O. (2012). Critical cost factors of building construction projects in Malaysia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 360-367.
- Townshend, D., & Duggie, A. (2007). Study on Green Roof Application in Hong Kong. *Hong Kong Government, Architectural Services Dept*.
- Ulubeyli, S., & Arslan, V. (16 de Enero de 2017). Economic viability of extensive green roofs through scenario and sensitivity analyses: Clients' perspective. *Energy and Buildings*, 314-325.
- US Environmental Protection Agency. (2014). Green Roofs. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*, 1-26.

- US Environmental Protection Agency. (27 de Junio de 2016). *Using Green Roofs to Reduce Heat Islands*. Recuperado el 27 de Febrero de 2017, de <https://www.epa.gov/heat-islands/using-green-roofs-reduce-heat-islands>
- Vegetal I. D. (2014). *Green innovation for smart cities*. Recuperado el 15 de Febrero de 2019, de <http://www.vegetalid.us/green-roof-technical-resources/green-roof-and-stormwater-management-incentives.html>
- Velázquez, J. A. (2014). Criterios analíticos para valuación de inmuebles sustentables Azoteas y muros verdes. *L Congreso Nacional de Valuación. Valuación: Presente, Pasado y Futuro* (págs. 1-34). Irapuato, Guanajuato: Sociedad de Ingenieros Civiles Valuadores, UNAM.
- Vijayaraghavana, K. (2015). Application of seaweed as substrate additive in green roofs: Enhancement of water retention and sorption capacity. *Landscape and Urban Planning*, 25-32.
- Wong, N. H., Tay, S. F., Wong, R., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment*, 499-509.
- Xiao, M., Lin, Y., Han, J., & Zhang, G. (23 de agosto de 2014). A review of green roof research and development in China. *Renewable and sustainable energy reviews*, 633-648.
- Zielinski, S., García Collante, M. A., & Vega Paternina, J. (Mayo de 2012). Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta? *Gestión y Ambiente*, 15(1), 91-104.

ANEXO A

El programa se desarrolló en un libro de **Microsoft Excel**. En este libro de Excel, se encuentran tres **Hojas** imprescindibles para la importación y exportación de los datos; la **Hoja "Insumos"**, que contiene la descripción y los precios de los materiales necesarios para la construcción de un techo verde extensivo; la **Hoja "Mano de Obra"**, que contiene los valores predeterminados de los costos de mano de obra directa de la instalación que, si el usuario del programa lo desea, tiene la opción de utilizar dicha información o asignar valores deseados de su preferencia y; la **Hoja "Parámetros y Costos"**, que almacenará los números estocásticos generados por el programa.

Se creó un botón llamado "*Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde*" que se encuentra en cinta de opciones de **Excel**, en la pestaña **Programador**, el cual permite acceder a la interfaz principal del formulario.

En la **Figura A.1**. Se puede observar que el formulario está compuesto por cuatro páginas ("*Proyecto*", "*Mano de Obra*", "*Insumos*" y "*Simulación Monte Carlo*" respectivamente), dentro de la página "*Proyecto*" se encuentra un Cuadro (**Frame**) llamado "*Superficie*", dentro de este hay dos Cajas de Texto (**TextBox**) en los cuales el usuario determina el área del techo de la losa previamente construido y el área del techo verde que se desea instalar. Asimismo, se encuentran los Botones de Comando (**CommandButton**) llamados "*Atrás*" y "*Siguiente*" los cuales permiten el desplazamiento por las páginas del formulario.

Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde

Proyecto | Mano de Obra | Insumos | Simulación Monte Carlo

Superficies

Superficie total del Techo (m²) 120

Superficie del Techo Verde (m²) 63

Atrás Siguiente Cerrar

Figura A.1. Interfaz del formulario "Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde".

A continuación, en la página "Mano de Obra" se presenta un **frame** llamado "Tipo de Mano de Obra Directa" que contiene un Cuadro Combinado (**ComboBox**) en el cual el usuario tiene la opción de elegir la característica del de techo sobre el cual se instalará el techo verde extensivo, ya sea "Techo Nuevo" o "Techo Viejo". La finalidad que tiene el programa entre la elección de estos dos es que el "Techo Viejo" toma como primera etapa el acondicionamiento del techo, por lo que se hace presente el lavado y la desinfección de la losa para posteriormente empezar la aplicación de los materiales del techo verde (**Figura A.2**), esto infiere en que se verá generado un costo adicional en el costo de mano de obra directa de la instalación, por consiguiente, un aplazamiento en los días propuestos para concluir las actividades. Contrariamente, si se selecciona el tipo de "Techo Nuevo", se deshabilitarán los costos de la **Etapa 1** de la mano de obra directa y los costos de los insumos de la misma, por lo que estos no se incluirán dentro de la simulación (**Figura A.3** y **Figura A.4**).

Tipo de Mano de Obra Directa
 Seleccione el tipo de costo de la instalación del techo Costo por Proyecto (\$MXN)
 Elija el tipo de techo sobre el cual se trabajará.
 Techo Viejo Precio de Trabajador por m² (\$MXN/m²)
 Desviación Típica (%)

Descripción de los Costos de Mano de Obra Directa
 A continuación, inserte el número de trabajadores, el precio por cada trabajador, los días que se trabajarán por cada etapa. Al finalizar, oprima aplicar para mostrar el costo total por etapa.

Mano de Obra	Número de Trabajadores	Precio (\$/MXN)	Días Trabajados por Etapa	Costo Total por Etapa
Etapas				
Etapas 1. Lavado y Desinfectado de Losa				
Supervisor Técnico	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="\$800"/>
Obrero	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="300"/>		
Etapas 2. Aplicación del Primario Asfáltico				
Supervisor Técnico	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="\$800"/>
Obrero	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="300"/>		
Etapas 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS				
Supervisor Técnico	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="\$1,100"/>
Obrero	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="300"/>		

Valores Predeterminados Uniforme Gaussiana Beta

Figura A.2. Opción de "Techo Viejo" y costos de mano de obra directa de la instalación por etapas.

Tipo de Mano de Obra Directa
 Seleccione el tipo de costo de la instalación del techo Costo por Proyecto (\$MXN)
 Elija el tipo de techo sobre el cual se trabajará.
 Techo Nuevo Precio de Trabajador por m² (\$MXN/m²)
 Desviación Típica (%)

Descripción de los Costos de Mano de Obra Directa
 A continuación, inserte el número de trabajadores, el precio por cada trabajador, los días que se trabajarán por cada etapa. Al finalizar, oprima aplicar para mostrar el costo total por etapa.

Mano de Obra	Número de Trabajadores	Precio (\$/MXN)	Días Trabajados por Etapa	Costo Total por Etapa
Etapas				
Etapas 1. Lavado y Desinfectado de Losa				
Supervisor Técnico	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="\$800"/>
Obrero	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="300"/>		
Etapas 2. Aplicación del Primario Asfáltico				
Supervisor Técnico	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="\$800"/>
Obrero	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="300"/>		
Etapas 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS				
Supervisor Técnico	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="\$1,100"/>
Obrero	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="300"/>		

Valores Predeterminados Uniforme Gaussiana Beta

Figura A.3. Opción de "Techo Nuevo" y costos de mano de obra directa de la instalación por etapas.

Adicionalmente, se agregó un **TextBox** llamado “Desviación Típica” que tiene como propósito asignar un porcentaje de variabilidad a los costos de mano de obra directa, siendo útil dentro de la generación de números estocásticos.

Presentación	Costo promedio	Costo mínimo	Costo máximo	Cantidad	Precio unitario (\$/m ²)
Etapa 1. Lavado y Desinfectado de Losa					
<input checked="" type="checkbox"/> Desinfectante (Hipoclorito de Sodio)	Bidón de 19 L. CLORO al 13%				
<input checked="" type="checkbox"/> Cepillo de Alambre	Unidad				
<input checked="" type="checkbox"/> Guantes de Goma	Unidad				
Etapa 2. Aplicación del Primario Asfáltico					
<input checked="" type="checkbox"/> Primario Asfáltico	Cubeta de 19 L				
<input checked="" type="checkbox"/> Rodillo para Solventes	Unidad				
<input checked="" type="checkbox"/> Par de Guantes para Solventes	Paquete				
<input checked="" type="checkbox"/> Brocha de Cerdas Sintéticas	Unidad				
Etapa 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS					
<input checked="" type="checkbox"/> Impermeabilizante Prefabricado SBS	Rollo de 10 m ²				
<input checked="" type="checkbox"/> Navaia	Unidad				
<input checked="" type="checkbox"/> Escoba	Unidad				
<input checked="" type="checkbox"/> Espátula	Unidad				
<input checked="" type="checkbox"/> Gas	Tanque con 20 Kg				

Figura A.4. Opción de “Techo Nuevo”; Etapa 1 de insumos deshabilitada.

Dentro de la pestaña “Mano de Obra” observan dos Botones de Opción (**OptionButton**): “Costo por Proyecto (\$MXN)” y “Precio de Trabajador por M² (\$MXN/m²)”. Al seleccionar la primera opción se visualiza un **frame** llamado “Descripción de los Costos de Mano de Obra Directa” que contiene un tabla con múltiples **TextBox** en la que el usuario puede elegir a su criterio el número de trabajadores, el precio por cada trabajador (“Supervisor Técnico” y “Obrero”) y los días que se trabajarán por cada etapa o bien, seleccionar el **CommandButton** de “Valores Predeterminados” que contiene por defecto valores asignados importados desde la **Hoja** de Excel “Mano de Obra”. Una vez cargado los datos en los **TextBox** puede pre-

visualizarse el costo total de la mano de obra de la instalación del techo verde y el tiempo total que se requiere concluirla (**Figura A.5 y Figura A.6**).

Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde

Proyecto | **Mano de Obra** | Insumos | Simulación Monte Carlo

Seleccione el tipo de costo de la instalación del techo Costo por Proyecto (\$MXN)

Elija el tipo de techo sobre el cual se trabajará.

Precio de Trabajador por m² (\$MXN/m²)

Descripción de los Costos de Mano de Obra Directa

A continuación, inserte el número de trabajadores, el precio por cada trabajador, los días que se trabajarán por cada etapa. Al finalizar, oprima aplicar para mostrar el costo total por etapa.

Mano de Obra	Número de Trabajadores	Precio (\$/MXN)	Días Trabajados por Etapa	Costo Total por Etapa
Etapas				
Etapas 1. Lavado y Desinfectado de Losa				
Supervisor Técnico	1	500	1	\$800
Obrero	1	300		
Etapas 2. Aplicación del Primario Asfáltico				
Supervisor Técnico	1	500	1	\$800
Obrero	1	300		
Etapas 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS				
Supervisor Técnico	1	500	1	\$1,100
Obrero	2	300		

Valores Predeterminados Uniforme Gaussiana Beta

Figura A.5. Pestaña “Mano de Obra” de la interfaz. Etapa 1, 2 y 3 de la opción “Costo por Proyecto”.

Tipo de Mano de Obra Directa
 Seleccione el tipo de costo de la instalación del techo Costo por Proyecto (\$MXN)
 Elige el tipo de techo sobre el cual se trabajará.
 Techo Viejo
 Precio de Trabajador por m² (\$MXN/m²)
 Desviación Típica (%) 20

Descripción de los Costos de Mano de Obra Directa
 Etapa 4. Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz

Supervisor Técnico	1	500	2	\$2,200
Obrero	2	300		

Etapa 5. Aplicación de la Materia Orgánica

Supervisor Técnico	1	500	2	\$2,200
Obrero	2	300		

Etapa 6. Aplicación de la Vegetación

Supervisor Técnico	1	500	2	\$1,600
Obrero	1	300		

Tiempo Total de Instalación (días) 9 Costo Total de Instalación (\$MXN) \$8,700

Valores Predeterminados Uniforme Gaussiana Beta Aplicar

Atrás Siguiete Cerrar

Figura A.6. Pestaña “Mano de Obra” de la interfaz. Etapa 4, 5 y 6 de la opción “Costo por Proyecto”.

Por el contrario, si se selecciona el **OptionButton** de “Precio de Trabajador por m² (\$MXN/m²)”, el **Frame** llamado “Descripción de los Costos de Mano de Obra Directa” no se visualizará y/o se deshabilitará debido a que, como la opción lo indica, el presupuesto se ha realizado por cada m² trabajado en la instalación del techo verde extensivo, por lo que se infiere que se tienen consideradas todas las actividades previstas de la instalación. Consecutivamente se visualizarán distintos **TextBox** dentro del **Frame** “Mano de Obra”, donde se podrá especificar el precio unitario de cada trabajador que se contemple dentro de las actividades, el número total de trabajadores, el tiempo total de la obra y por último se pre-visualizará el costo total de la instalación dentro del **TextBox** asignado a este. Cabe señalar que los dos **OptionButton** previamente descritos, tienen habilitado el **TextBox** de “Desviación Típica” y dos tipos de funciones de probabilidad definidos en el presente estudio (probabilidad uniforme y gaussiana) (Figura A.7).

Simulador de Predios y Costos de un Techo Verde

Proyecto | Mano de Obra | Insumos | Simulación Monte Carlo

Tipo de Mano de Obra Directa
Seleccione el tipo de costo de la instalación del techo Costo por Proyecto (SMXN) Precio de Trabajador por m² (SMXN/m²)

Elija el tipo de techo sobre el cual se trabajará.
Techo Viejo

Número de Trabajador(es) 2
Tiempo Total de Instalación (días) 10
Desviación Típica (%) 20
Costo Total de Instalación (SMXN) \$9,450

Seleccione el cuadro para actualizar costo

Uniforme Gaussiana Beta

Atrás Siguiete Cerrar

Figura A.7. Pestaña “Mano de Obra” de la interfaz; opción “Precio de Trabajador por m²”.

A continuación, se presenta en la página “Insumos”, un **frame** llamado “Materiales de Construcción del Techo Verde” donde se visualiza un **CommandButton** llamado “Importar datos” que tiene la función de importar la información presente de la **Hoja de Excel** “Insumos” donde se localizan los costos, las cantidades y el precio unitario de los materiales hacia los múltiples **TextBox** existentes en la pestaña “Insumos”. Se puede observar que cada insumo está clasificado de acuerdo a cada etapa en el que se utilizará, estos a su vez, se pueden seleccionar uno por uno con las Casillas de Verificación (**CheckList**) o bien, se puede hacer uso de los **OptionButton** “Marcar/Desmarcar todas las casillas” si se desea agregar y/o eliminar todos los insumos a la simulación. Posteriormente, se selecciona el **CommandButton** llamado “Aplicar” con el objetivo de agregar todos los insumos seleccionados al **Frame** “Simulación Monte Carlo” (Figura A.8 y Figura A.9).

Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde

Proyecto | Mano de Obra | Insumos | Simulación Monte Carlo

Materiales de Construcción del Techo Verde

Seleccione las casillas de los materiales que desee agregar a la simulación y al finalizar, seleccione Aplicar.

Importar Datos	Presentación	Costo promedio	Costo mínimo	Costo máximo	Cantidad	Precio unitario (\$/m ²)
Etapas 1. Lavado y Desinfectado de Losa						
<input checked="" type="checkbox"/> Desinfectante (Hipoclorito de Sodio)	Bidón de 19 L. NaClO al 13%	\$250.00	\$200.00	\$300.00	1	\$1.58
<input type="checkbox"/> Cepillo de Alambre	Unidad	\$39.95	\$35.00	\$44.90	2	\$0.50
<input type="checkbox"/> Guantes de Goma	Unidad	\$49.50	\$39.50	\$59.50	2	\$0.62
Etapas 2. Aplicación del Primario Asfáltico						
<input checked="" type="checkbox"/> Primario Asfáltico	Cubeta de 19 L	\$759.05	\$478.04	\$1040.06	2	\$9.56
<input checked="" type="checkbox"/> Rodillo para Solventes	Unidad	\$40.00	\$32.00	\$48.00	2	\$0.50
<input checked="" type="checkbox"/> Par de Guantes para Solventes	Paquete	\$49.50	\$39.50	\$59.50	2	\$0.62
<input checked="" type="checkbox"/> Brocha de Cerdas Sintéticas	Unidad	\$68.50	\$54.00	\$83.00	1	\$0.43
Etapas 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS						
<input checked="" type="checkbox"/> Impermeabilizante Prefabricado SBS	Rollo de 10 m ²	\$2718.54	\$1800.00	\$3637.07	7	\$171.27
<input type="checkbox"/> Navaja	Unidad	\$25.00	\$12.00	\$38.00	1	\$0.16
<input type="checkbox"/> Escoba	Unidad	\$31.85	\$21.70	\$42.00	1	\$0.20
<input type="checkbox"/> Espátula	Unidad	\$35.50	\$23.00	\$48.00	1	\$0.22
<input checked="" type="checkbox"/> Gas	Tanque con 20 Kg	\$390.00	\$360.00	\$420.00	1	\$2.46

Marcar todas las casillas Desmarcar todas las casillas **Aplicar**

Atrás Siguiete Cerrar

Figura A.8. Pestaña "Insumos"; "Materiales de Construcción del Techo Verde". Etapa 1, 2 y 3.

Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde

Proyecto | Mano de Obra | Insumos | Simulación Monte Carlo

Materiales de Construcción del Techo Verde

<input checked="" type="checkbox"/> Gas	Tanque con 20 Kg	\$390.00	\$360.00	\$420.00	1	\$2.46
Etapas 4. Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz						
<input checked="" type="checkbox"/> Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz	Rollo de 40 m ²	\$6178.07	\$4696.65	\$7659.48	2	\$77.84
<input checked="" type="checkbox"/> Solera Tapajuntas de Polietileno	Unidad	\$47.50	\$45.00	\$50.00	13	\$5.99
<input checked="" type="checkbox"/> Clavo de Acero Galvanizado de 1 1/2"	Paquete con 232 Unidades Aprox	\$49.33	\$43.65	\$55.00	1	\$0.31
<input type="checkbox"/> Martillo de Uña Curva 7 Oz	Unidad	\$71.00	\$53.00	\$89.00	1	\$0.45
<input type="checkbox"/> Flexómetro de 5 m	Unidad	\$77.00	\$68.00	\$86.00	1	\$0.49
Etapas 5. Aplicación de la Materia Orgánica						
<input checked="" type="checkbox"/> Agrolita/Perlita	Costal de 100 L	\$230.00	\$210.00	\$250.00	6	\$11.59
<input checked="" type="checkbox"/> Materia Orgánica	Costal de 107 L	\$225.00	\$210.00	\$240.00	6	\$11.34
<input type="checkbox"/> Pala de Cuchara Metálica	Unidad	\$132.00	\$105.00	\$159.00	2	\$1.66
<input type="checkbox"/> Rastrillo de Plástico	Unidad	\$63.00	\$70.00	\$56.00	2	\$0.79
<input type="checkbox"/> Carretilla	Unidad	\$597.00	\$545.00	\$649.00	1	\$3.76
<input type="checkbox"/> Hilo para Nivelación	Unidad de 165 m	\$28.50	\$22.00	\$35.00	1	\$0.18
Etapas 6. Aplicación de la Vegetación						
<input checked="" type="checkbox"/> Pala Jardinera de Mano	Unidad	\$59.00	\$50.00	\$68.00	2	\$0.74
<input checked="" type="checkbox"/> Vegetación	Unidad	\$47.72	\$30.43	\$65.00	16	\$7.52

Marcar todas las casillas Desmarcar todas las casillas **Aplicar**

Atrás Siguiete Cerrar

Figura A.9. Pestaña "Insumos"; "Materiales de Construcción del Techo Verde". Etapa 4, 5 y 6.

Por último, en la pestaña “*Simulación Monte Carlo*” se encuentra un **Frame** llamado “*Tipo de Función de Probabilidad de los Materiales*” en el cual se pueden observar todos los insumos que se seleccionaron con los **CheckList** de la pestaña anterior, por ende, si algún insumo no se marcó con anterioridad, este no se encontrará habilitado para la simulación de los precios en esta pestaña, asimismo, si se selecciona el tipo de “*Techo Nuevo*” la **Etapa 1** estará deshabilitada para la pestaña de la Simulación Monte Carlo como puede verse en la **Figura A.10**. El tipo de distribución predeterminado es la función gaussiana.

Se puede observar que cada insumo cuenta con un **ComboBox** habilitado para poder elegir el tipo de función de probabilidad que tendrán, ya sea uniforme, gaussiana o beta. A continuación se muestra un ejemplo de cada uno de ellos en la **Figura A.11**, **Figura A.12** y **Figura A.13**, respectivamente.

Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde

Proyecto | Mano de Obra | Insumos | Simulación Monte Carlo

Tipo de Función de Probabilidad de los Materiales

Elija el tipo de función de probabilidad para cada material seleccionado en cada una de sus etapas.

Etapa 1. Lavado y Desinfectado de Losa

Desinfectante (Hipoclorito de Sodio)

Cepillo de Alambre

Guantes de Goma

Etapa 2. Aplicación del Primario Asfáltico

Primario Asfáltico

Rodillo para Solventes

Par de Guantes para Solventes

Brocha de Cerdas Sintéticas

Etapa 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS

Impermeabilizante Prefabricado SBS

Navaja

Escoba

Etapa 4. Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz

Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz

Solera Tapajuntas de Polietileno

Clavo de Acero Galvanizado de 1 1/2"

Martillo de Uña Curva 7 Oz

Flexómetro de 5 m

Etapa 5. Aplicación de la Materia Orgánica

Agrolita/Perlita

Materia Orgánica

Pala de Cuchara Metálica

Rastrillo de Plástico

Carretilla

Hilo para Nivelación

Parámetros de simulación estocástica

Número de eventos estocásticos Uniforme Gaussiana Beta

Figura A.10. Pestaña “*Simulación Monte Carlo*”; “*Tipo de Función de Probabilidad de los Materiales*”.

The screenshot shows the 'Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde' software interface. The 'Proyecto' tab is selected, and the 'Tipo de Función de Probabilidad de los Materiales' section is active. The interface is divided into five stages (Etapa 1 to Etapa 5), each with a list of materials and a dropdown menu for selecting a probability distribution. In this view, all dropdown menus are set to 'Uniforme'. At the bottom, the 'Parámetros de simulación estocástica' section shows 'Número de eventos estocásticos' set to 10000, with radio buttons for 'Uniforme' (selected), 'Gaussiana', and 'Beta'. A 'Simular' button is located to the right of these options. Navigation buttons 'Atrás', 'Siguiente', and 'Cerrar' are at the bottom of the window.

Etapa	Material	Distribución
Etapa 1. Lavado y Desinfectado de Losa	Desinfectante (Hipoclorito de Sodio)	Uniforme
	Cepillo de Alambre	Uniforme
	Guantes de Goma	Uniforme
Etapa 2. Aplicación del Primario Asfáltico	Primario Asfáltico	Uniforme
	Rodillo para Solventes	Uniforme
	Par de Guantes para Solventes	Uniforme
	Brocha de Cerdas Sintéticas	Uniforme
Etapa 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS	Impermeabilizante Prefabricado SBS	Uniforme
	Navaja	Uniforme
	Escoba	Uniforme
Etapa 4. Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz	Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz	Uniforme
	Solera Tapajuntas de Polietileno	Uniforme
	Clavo de Acero Galvanizado de 1 1/2"	Uniforme
	Martillo de Uña Curva 7 Oz	Uniforme
	Flexómetro de 5 m	Uniforme
Etapa 5. Aplicación de la Materia Orgánica	Agrolita/Perlita	Uniforme
	Materia Orgánica	Uniforme
	Pala de Cuchara Metálica	Uniforme
	Rastrillo de Plástico	Uniforme
	Carretilla	Uniforme
Hilo para Nivelación	Uniforme	

Figura A.11. Selección de "Techo Viejo" y tipo de distribución uniforme.

The screenshot shows the same software interface as Figure A.11, but with all dropdown menus for probability distributions set to 'Gaussiana'. The 'Parámetros de simulación estocástica' section now has the 'Gaussiana' radio button selected. The 'Simular' button and navigation buttons remain the same.

Etapa	Material	Distribución
Etapa 1. Lavado y Desinfectado de Losa	Desinfectante (Hipoclorito de Sodio)	Gaussiana
	Cepillo de Alambre	Gaussiana
	Guantes de Goma	Gaussiana
Etapa 2. Aplicación del Primario Asfáltico	Primario Asfáltico	Gaussiana
	Rodillo para Solventes	Gaussiana
	Par de Guantes para Solventes	Gaussiana
	Brocha de Cerdas Sintéticas	Gaussiana
Etapa 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS	Impermeabilizante Prefabricado SBS	Gaussiana
	Navaja	Gaussiana
	Escoba	Gaussiana
Etapa 4. Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz	Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraiz	Gaussiana
	Solera Tapajuntas de Polietileno	Gaussiana
	Clavo de Acero Galvanizado de 1 1/2"	Gaussiana
	Martillo de Uña Curva 7 Oz	Gaussiana
	Flexómetro de 5 m	Gaussiana
Etapa 5. Aplicación de la Materia Orgánica	Agrolita/Perlita	Gaussiana
	Materia Orgánica	Gaussiana
	Pala de Cuchara Metálica	Gaussiana
	Rastrillo de Plástico	Gaussiana
	Carretilla	Gaussiana
Hilo para Nivelación	Gaussiana	

Figura A.12. Selección de "Techo Viejo" y tipo de distribución gaussiana.

Figura A.13. Selección de “Techo Viejo” y tipo de distribución beta.

Así también, se encuentran tres **OptionButton** que habilitan estas funciones en todos los **ComboBox** presentes para mayor comodidad del usuario. La opción beta visualiza y habilita dos **TextBox** adicionales para cada insumo que lo requiera, en estos **TextBox** se incluirán los valores *alfa* y *beta*, parámetros requeridos por la distribución (Figura A.13). Cabe señalar que puede elegirse más de un tipo de distribución para una sola simulación de los costos de instalación del techo verde, en la Figura A.14 se muestra un ejemplo.

Una vez definido el tipo de probabilidad en que se simulará cada insumo, dentro del **TextBox** llamado “Número de eventos estocásticos” se anota el número de iteraciones o simulaciones que se desea el programa realice a cada insumo seleccionado con su respectiva función de probabilidad asignada, al finalizar se selecciona el **CommandButton** llamado “Simular”. El resultado de la generación de los números

estocásticos se podrá observar en la **Hoja de Excel** llamada “**Parámetros y costos**” del mismo **Libro de Excel**.

Simulador de Precios y Costos de un Techo Verde

Proyecto | Mano de Obra | Insumos | **Simulación Monte Carlo**

Tipo de Función de Probabilidad de los Materiales

Etapa	Material	Distribución	Alfa	Beta
Etapa 1. Lavado y Desinfectado de Losa	Desinfectante (Hipoclorito de Sodio)	Gaussiana		
	Cepillo de Alambre	Gaussiana		
	Guantes de Goma	Gaussiana		
Etapa 2. Aplicación del Primario Asfáltico	Primario Asfáltico	Gaussiana		
	Rodillo para Solventes	Gaussiana		
	Par de Guantes para Solventes	Gaussiana		
	Brocha de Cerdas Sintéticas	Gaussiana		
Etapa 3. Instalación del Impermeabilizante Prefabricado SBS	Impermeabilizante Prefabricado SBS	Beta	5.028	1.676
	Navaja	Gaussiana		
	Escoba	Gaussiana		
	Espátula	Gaussiana		
	Cae	Gaussiana		
Etapa 4. Instalación de la Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraíz	Lámina Nodular de Polietileno para Drenaje Antiraíz	Beta		5.0
	Solera Tapajuntas de Polietileno	Gaussiana		
	Clavo de Acero Galvanizado de 1 1/2"	Gaussiana		
	Martillo de Uña Curva 7 Oz	Gaussiana		
	Flexómetro de 5 m	Gaussiana		
Etapa 5. Aplicación de la Materia Orgánica	Agrolita/Perlita	Gaussiana		
	Materia Orgánica	Gaussiana		
	Pala de Cuchara Metálica	Gaussiana		
	Rastrillo de Plástico	Gaussiana		
Etapa 6. Aplicación de la Vegetación	Carretilla	Gaussiana		
	Hilo para Nivelación	Gaussiana		
	Pala Jardinera de Mano	Gaussiana		

Parámetros de simulación estocástica

Número de eventos estocásticos: 10000

Uniforme Gaussiana Beta

Simular

Atrás | Siguiete | Cerrar

Figura A.14. Pestaña “Simulación Monte Carlo”; Función de probabilidad gaussiana y beta.