



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE CALOR EN
UN TECHO VERDE Y SU APLICACIÓN EN LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN ZONAS URBANAS CON CLIMA TROPICAL HÚMEDO**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y
MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES**

PRESENTA:

M. EN C. ADRIANA DE LA CRUZ URIBE

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. JOSÉ ROBERTO HERNÁNDEZ BARAJAS

VILLAHERMOSA, TABASCO; OCTUBRE DE 2024.

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 23 del mes septiembre del año 2024, el que suscribe Adriana de la Cruz Uribe alumna del Programa de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales con número de matrícula 162G14002, adscrito a la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentada para la obtención del título Doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales y titulada Modelo Matemático para la Estimación del Balance de Calor en un Techo Verde y su Aplicación en la Reducción del Consumo de Energía Eléctrica en Zonas Urbanas con Clima Tropical Húmedo dirigida por Doctor José Roberto Hernández Barajas.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 23 de septiembre de 2024.



Adriana de la Cruz Uribe



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

DIRECCIÓN
Villahermosa, Tab., a 11 de Septiembre de 2024

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. ADRIANA DE LA CRUZ URIBE** egresada del Doctorado en **CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Doctorado denominado: **"MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE CALOR EN UN TECHO VERDE Y SU APLICACIÓN EN LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ZONAS URBANAS CON CLIMA TROPICAL HÚMEDO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

SEPTIEMBRE 11 DE 2024

**C. ADRIANA DE LA CRUZ URIBE
PAS. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y
MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales titulado: **"MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE CALOR EN UN TECHO VERDE Y SU APLICACIÓN EN LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ZONAS URBANAS CON CLIMA TROPICAL HÚMEDO"**, asesorado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por la Dra. Erika Escalante Espinosa, Dra. Ena Edith Mata Zayas, Dr. José Roberto Hernández Barajas, Dr. José Ramón Laines Canepa, Dra. Carolina Zequeira Larios, Dra. Liliانا Pampillón González y Dr. Raúl German Bautista Margulis.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

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

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

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



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tabasco a 05 de septiembre de 2024

C. ADRIANA DE LA CRUZ URIBE

EGRESADA DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA
Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES
P R E S E N T E

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los trabajos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el SNP-COAHUQUILTECO.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento de tesis. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, se realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y se emitieron las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: ***"Modelo matemático para la estimación del balance de calor en un techo verde y su aplicación en la reducción del consumo de energía eléctrica en zonas urbanas con clima tropical húmedo"***.

OBSERVACIONES:

1. **El índice de similitud obtenido fue de 11%**, el cual se ubica dentro del estándar de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT. Se demuestra el nivel de originalidad del documento y de la investigación.
2. Se destaca el aporte al índice de similitud de -1% por la publicación del artículo "Análisis Beneficio-Costo de la Instalación de Techos Verdes Extensivos en Condiciones de Trópico Húmedo" de su autoría derivado de la investigación doctoral publicado en la revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios (2023).
3. Se identificó un 1% del índice de similitud que se vincula con la revisión de fuentes primarias de citación de internet específicamente, docplayer.es, SciELO, ResearchGate, Springer, además de Repositorios Institucionales, entre otros más.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024
Felipe Carrillo
PUERTO
GOBIERNO DEL ESTADO DE TABASCO

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

4. **Se adjunta el informe de originalidad de la tesis** obtenido a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
5. Finalmente, se le solicita a la C. Adriana De La Cruz Uribe, integrar en la versión final de tesis, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

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


DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.C.P. Dr. José Roberto Hernández Barajas. Director de Tesis.
Archivo

Modelo matemático para la estimación del balance de calor en un techo verde y su aplicación en la reducción del consumo de energía eléctrica en zonas urbanas con clima tropical húmedo

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	docplayer.es <small>Internet</small>	265 palabras — 1%
2	era.ujat.mx <small>Internet</small>	251 palabras — 1%
3	ri.ujat.mx <small>Internet</small>	228 palabras — 1%
4	repositorio.unfv.edu.pe <small>Internet</small>	118 palabras — 1%
5	www.researchgate.net <small>Internet</small>	75 palabras — < 1%
6	www.scielo.org.mx <small>Internet</small>	46 palabras — < 1%
7	rinacional.tecnm.mx <small>Internet</small>	42 palabras — < 1%
8	www.coursehero.com <small>Internet</small>	41 palabras — < 1%

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 23 de septiembre de 2024.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada Modelo Matemático para la Estimación del Balance de Calor en un Techo Verde y su Aplicación en la Reducción del Consumo de Energía Eléctrica en Zonas Urbanas con Clima Tropical Húmedo.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES

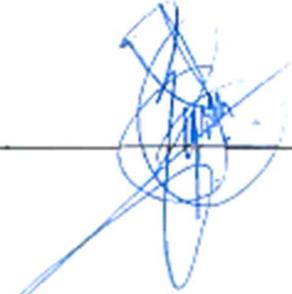

Adriana de la Cruz Uribe


Dr. José Roberto Fernández Barajas

ALUMNO(A) O EGRESADA(O),

DIRECTOR(A) Y CODIRECTOR(A)

TESTIGOS





DEDICATORIA

A mi amada Tana... Que desde donde estes puedas ver que lo logré.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

AGRADECIMIENTOS

A Dr. José Roberto Hernández Barajas, por compartir sus conocimientos, tenerme paciencia y llegar hasta el final... ¡Gracias!

A (CONACyT) por la beca que me otorgó para realizar mis estudios de posgrado.

A mi Comité Sinodal, por cada consejo y observación que me proporcionaron.

A mi familia, quien con tanta paciencia aguardaron cada momento que estuve ocupada en este proyecto.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	15
Protocolo de tesis.....	15
Introducción.....	16
Antecedentes.....	19
Justificación.....	30
Objetivos.....	32
Hipótesis.....	33
Materiales y métodos.....	33
Presupuesto.....	37
Referencias.....	38
CAPÍTULO 2.....	43
Análisis Beneficio-Costo de la Instalación de Techos Verdes Extensivos en Condiciones de Trópico Húmedo.....	43
Resumen.....	46
Palabras clave.....	47
Abstract.....	47
Introducción.....	47
Materiales y métodos.....	49
Resultados.....	55
Discusión.....	63
Conclusiones.....	65
Agradecimientos.....	65
Referencias.....	66
CAPÍTULO 3.....	69
Mathematical Model for the Heat Balance of a Green Roof in Humid Tropics Conditions.....	69
Abstract.....	72
Introduction.....	74
Materials and methods.....	76
Results and discussion.....	83
Conclusions.....	88

Acknowledgments	89
Literature cited	90
CAPÍTULO 4	93
Conclusiones generales.....	93
Anexo 1	95
Evidencia de artículos.....	95
Anexo 2	98
Alojamiento de la tesis en el repositorio institucional	98

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de los elementos que forman el proyecto en su etapa de construcción.	51
Tabla 2. Descripción de los tipos de vivienda residencial en función del consumo de energía eléctrica, número de niveles, área y tipo de techado.....	52
Tabla 3. Costos unitarios de materiales de construcción de las capas de techo verde extensivo en la vivienda tipo 2L-98A-3E-GR.	56
Tabla 4. Impactos ambientales potenciales de acuerdo con el análisis de ciclo de vida empleando IE4B.....	58
Tabla 5. Resumen del análisis beneficio-costo de la instalación de techos verdes extensivos en climas tropicales.....	62
Table 1. Parameter values of any of the functions r_i	79
Table 2. Scenarios depending on the time of the year.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la cuota de mantenimiento sobre la relación beneficio-costo para el escenario más probable y el peor escenario.....59

Figura 2. Efecto de la inflación y de la tasa de interés sobre la relación beneficio-costo para a) el escenario más probable, y b) el peor escenario.61

Figure 1. Main components of a green roof: vegetation cover, growth substrate and structural support.77

Figure 2. The Beta distribution adjusts the experimental values with respect to the angular distribution.84

Figure 3. Normalized sine functions, according to the values presented in Table 1.....84

Figure 4. Internal resistance values, considering solar radiation and air temperature.....85

Figure 5. Temperature profile in the green roof vegetation layer during three seasons in Villahermosa, Tabasco.....86

Figure 6. Moisture profile in the vegetation layer of the green roof during three seasons of the year in Villahermosa, Tabasco.87

Figure 7. Temperature profile in the structural support layer.88

CAPÍTULO 1

PROTOCOLO DE TESIS

Introducción

Las actuales tendencias demográficas, sociales y tecnológicas plantean grandes retos para la sustentabilidad energética, tales como el aumento del consumo de energía, el dominio de los combustibles fósiles como la mayor fuente de energía, el aumento en más de la mitad de las emisiones de CO₂ en el planeta y la carencia de cobertura del servicio de energía eléctrica a la población socioeconómicamente vulnerable. Por efecto de la contaminación, el calentamiento global ha provocado que las temperaturas promedio se hayan incrementado drásticamente en las últimas décadas; en México, el aumento es de aproximadamente 1 °C para el mes más caluroso (mayo) en el período 1990-2009 (The World Bank Group, 2012). Además de este incremento de temperatura vinculado al calentamiento global, en las zonas urbanas ocurre un fenómeno conocido como isla urbana de calor por lo que la temperatura ambiente de las áreas urbanas es mayor que el de las áreas rurales vecinas (Jáuregui, 2004; EPA, 2008a). Esto provoca un microclima poco agradable para los habitantes de las ciudades localizadas en regiones tropicales, por lo cual es común que se recurra al uso de equipos para el acondicionamiento del aire al interior de las viviendas. En México, el acondicionamiento del aire ocupa el segundo lugar en el consumo promedio de electricidad por aparato en una vivienda, superado únicamente por el refrigerador (SENER, 2011). Se prevé que el consumo de energía aumentará en un 53% hacia el año 2030 (OECD, 2010). Esta demanda creciente de energía ha requerido de una provisión sostenida que cumpla con los requerimientos presentes sin comprometer la disponibilidad de energía para generaciones futuras. La sustentabilidad energética puede alcanzarse desarrollando dos tipos de tecnología, la primera se refiere al aprovechamiento de fuentes renovables de energía y la segunda a mejorar la eficiencia energética vinculada a las actividades humanas. El mejoramiento de la eficiencia energética es el paso inicial en esta búsqueda para alcanzar la sustentabilidad ya que es una tecnología más barata, más rápida de implementar y más amigable con el ambiente comparada con las nuevas tecnologías basadas en fuentes renovables que requieren de mayor inversión de recursos e infraestructura para la investigación y consolidación de estas. Sin embargo, los programas de eficiencia energética suelen carecer de aceptación social, opciones adecuadas de financiamiento, información e incentivos apropiados como es el caso de la reducción o exención de

impuestos. Al respecto, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OECD, del inglés *Organisation for Economic Cooperation and Development*) sugiere como una medida para el mejoramiento de la eficiencia energética que los nuevos edificios sean hasta un 70% más eficientes que los edificios actuales a través del uso de tecnologías y materiales de aislamiento térmico, sistemas de ventilación e iluminación natural, así como equipos de aire acondicionado y de calefacción con tecnología avanzada que consume menor energía eléctrica (OECD, 2007; OECD, 2010).

Una de las tecnologías más promisorias para el aislamiento térmico en edificios es el techo ecológico, conocido también como azotea o techo verde, techo viviente, techo-jardín o ecotecho, es un sistema liviano de techado para edificios urbanos que contiene suelo como sustrato de crecimiento para una capa de vegetación situada en el extremo superior y que ha sido empleado históricamente como un sistema de aislamiento en regiones templadas, y como un sistema de enfriamiento en regiones cálidas. En ambos sistemas, el uso de un techo ecológico disminuye significativamente el costo anual en energía eléctrica de un edificio que es necesario tanto para calefacción como acondicionamiento de aire (Sailor, 2008).

A la instalación de un techo ecológico se le atribuyen múltiples ventajas tales como el mejoramiento del clima urbano al disminuir el efecto de la isla de calor, la disminución del efecto invernadero debido a la fijación de carbono por parte de la capa de vegetación así como la reducción de contaminantes atmosféricos, la captación de agua pluvial que ayuda a disminuir la velocidad de escurrimiento que en consecuencia reduce el riesgo de inundaciones, la protección a la biodiversidad creando un nicho ecológico para insectos y aves, la disminución de la erosión y corrosión de los componentes estructurales del edificio ante tormentas y vientos, la reducción del nivel de ruido en los alrededores, y el ofrecimiento de un sitio de descanso, recreación y actividad social para los habitantes del edificio (Lundholm y Peck, 2008; Spala *et al.*, 2008; Martens *et al.*, 2008).

Desde la perspectiva de los procesos térmicos asociados, el techo ecológico reduce la transferencia de calor a través del techo de un edificio, reduciendo así el consumo de energía eléctrica para calentar o enfriar al mismo. Los tres mecanismos de transferencia de calor, conducción, convección y radiación son afectados por la capa de vegetación del techo ecológico no sólo por el cambio en las características térmicas de los materiales sino también por la evapotranspiración y los procesos metabólicos que ocurren en el micro-ecosistema. Por ello, es conveniente analizar el desempeño térmico de los diferentes componentes de un techo ecológico para establecer el efecto individual de cada uno de ellos sobre el balance global de calor (Martens *et al.*, 2008). Este balance de calor puede estimarse a partir del uso de un modelo matemático de tipo mecanístico; es decir, basado en leyes de conservación de la masa, energía y cantidad de movimiento. Un modelo de este tipo permitiría establecer relaciones matemáticas entre las variables medibles en un techo ecológico (temperatura, precipitación, humedad y radiación solar del ambiente), y las variables respuesta (perfiles de temperatura y humedad en el sustrato y el comportamiento térmico del material del soporte del techo, así como en el interior de un edificio).

En esta investigación se propone desarrollar un modelo matemático que represente los fenómenos fisicoquímicos y biológicos relacionados directamente en la capacidad de un techo ecológico para disminuir la penetración de la temperatura exterior hacia el interior de edificios de áreas urbanas con clima tropical húmedo con el propósito principal de reducir el consumo anual de energía eléctrica. El modelo propuesto es ajustado numéricamente a partir de información recopilada desde una unidad experimental, localizada en Villahermosa y sobre la cual se establecieron especies vegetales nativas del sureste mexicano. En la deducción del modelo se consideran al menos tres componentes de un techo ecológico: soporte estructural (membrana impermeable, barrera de raíces y sistema de drenaje), sustrato de crecimiento y cobertura vegetal como es sugerido por Palomo del Barrio (1998) y Alexandri y Jones (2007).

Como resultado de investigación, se obtuvo un modelo matemático robusto y aplicable a condiciones reales que permitirá analizar el efecto de variables de operación y criterios

de diseño sobre el desempeño de la instalación de un techo ecológico para reducir la ganancia térmica hacia el interior de edificios urbanos en regiones con clima tropical húmedo. Finalmente, esta investigación aspira a coadyuvar en el establecimiento de bases técnicas para la construcción de techos ecológicos empleando especies nativas, contribuir al impulso de la sustentabilidad energética en los sectores doméstico, comercial, turístico de la región, y aportar conocimiento para demostrar que la instalación de un techo verde no sólo es ecológicamente amigable sino también económicamente viable.

Antecedentes

Contexto de la investigación

En México existe una capacidad efectiva de generación de energía eléctrica de 51 mil MW de los cuales 46% corresponden a energía termoeléctrica, 22% a energía hidroeléctrica, 22% a productores externos de energía y el resto a otros tipos de energía tales como eólica, geotérmica, nuclear y combustión de carbón. Debido a la creciente demanda de energía eléctrica, el gobierno mexicano permitió la participación de la inversión privada en la generación de energía eléctrica y dicha participación representa actualmente el 22% de la generación total de energía eléctrica (SENER, 2014).

Durante 2014, el consumo de energía eléctrica por parte del sector residencial fue del 22.6%, mientras que para el sector comercial representó una proporción del 5.9%; es decir, en conjunto estos dos sectores requieren casi el 30% del consumo anual de energía eléctrica nacional. El tipo de líneas de energía eléctrica que requieren estos sectores son de media y baja tensión, precisamente el tipo de líneas que representan hasta el 10% de la pérdida de energía eléctrica y que ocurren debido a problemas técnicos (antigüedad de las líneas de distribución) y problemas no técnicos (robo de energía eléctrica). Las líneas de transmisión eléctrica de media y baja tensión representan entre el 82% del capital activo fijo de Comisión Federal de Electricidad, la empresa productiva del Estado Mexicano. Esta información indica claramente que los costos de mantenimiento se deben, principalmente, a la distribución y transmisión de

energía eléctrica a los sectores doméstico y comercial (SENER, 2014). Las tarifas de energía eléctrica son significativamente menores para los sectores doméstico y comercial comparadas con las tarifas del sector industrial. Lo anterior demuestra que las compañías nacionales que brindan el servicio de energía eléctrica podrían enfocar mayor atención a prestar servicio a la industria nacional (promoviendo su desarrollo al disminuir las tarifas para este sector) si los sectores doméstico y comercial disminuyeran su demanda de energía.

El techo ecológico es la tecnología de sustentabilidad energética que mayor crecimiento ha mostrado en los últimos años. Hoy en día, Alemania es el líder mundial en la tecnología de techos verdes, donde más del 10% de sus casas tienen instalado un techo verde, W.C. *et al.* (2014). Desafortunadamente, existen muy pocos estudios del desempeño de techos ecológicos en regiones tropicales, caracterizadas por un clima cálido y húmedo en la mayor parte del año. Las pocas investigaciones para este tipo de regiones se refieren a techos instalados en Asia y África, empleando especies vegetales que, elementalmente, no son nativas de México. Sumado a esto, en nuestro país existen compañías que ofrecen el servicio de diseño e instalación de techos verdes, sin embargo, sus diseños están basados en investigaciones realizadas bajo condiciones diferentes a las de una región tropical, disminuyendo el beneficio ecológico de los techos verdes.

Modelos matemáticos del balance de calor en techos verdes

El desempeño de un techo ecológico ha sido estimado no sólo con unidades experimentales sino también a partir de modelos matemáticos. Los modelos matemáticos tienen la ventaja de permitir el análisis de diferentes escenarios al modificar los parámetros y criterios de diseño de un techo ecológico. Uno de los primeros modelos matemáticos de techos ecológicos fue propuesto por Palomo del Barrio (1998). La autora emplea un modelo dinámico del comportamiento térmico de techos ecológicos reales analizando la sensibilidad paramétrica del mismo. La conclusión principal de este trabajo es que los techos ecológicos son, principalmente, un medio de aislamiento de un edificio reduciendo el *flux* de calor que ingresa al mismo. Los parámetros más sensibles en el modelo fueron el índice del área de la hoja (LAI, del inglés *leaf area index*, este índice es

una medida de la densidad de vegetación), la geometría de la hoja, la densidad aparente del suelo, la profundidad del suelo y el contenido de humedad.

Lazzarin *et al.* (2005) propusieron un modelo matemático integrado a un programa de simulación de energía en edificios. Además, los autores realizaron mediciones experimentales durante el verano. Por su parte, Kumar y Kaushik (2005) presentaron un modelo basado en ecuaciones aplicadas a un volumen de control y discretizadas a través de diferencias finitas. Como en el caso del modelo de Palomo del Barrio (1998), los autores consideraron una interacción entre tres componentes del techo ecológico: cobertura vegetal, capa de sustrato y capa de soporte. El modelo fue validado con datos experimentales de un techo ecológico localizado en la India encontrándose desviaciones menores al 6% en la predicción de la temperatura en el interior del edificio. Alexandri y Jones (2007) desarrollaron un modelo dinámico unidimensional para describir la transferencia de masa y calor en techos ecológicos. Los autores validaron el modelo empleando una unidad experimental y analizando detalladamente el efecto del coeficiente de transferencia de calor por convección y la resistencia de estomas. En una publicación posterior, los mismos autores propusieron un modelo avanzado en dos dimensiones estudiando diferentes geometrías del cañón urbano de calor concluyendo que la velocidad del viento en los alrededores de un edificio es un parámetro importante en el ahorro energético (Alexandri y Jones, 2008).

Posteriormente, Sailor (2008) propuso un modelo para techos ecológicos que permite analizar el efecto de las propiedades térmicas del suelo, su profundidad, las características de la vegetación tales como tipo de planta, altura promedio y el LAI. El modelo ha sido incluido como un módulo de un programa simulador de energía y ha sido probado en techos ecológicos situados en varias ciudades de los Estados Unidos. La conclusión principal del estudio es que los parámetros más significativos en la eficiencia energética asociada a un techo ecológico son la profundidad del suelo, la irrigación, la densidad de la vegetación y el tipo de clima. Ouldboukhitine *et al.* (2011) realizaron una evaluación del comportamiento térmico de techo verde a través de un modelo acoplado en transferencia de calor y masa, en él se estableció la eficiencia energética de edificios,

proporcionando un efecto de enfriamiento en el verano, y un aprovechamiento de la radiación solar debido a las propiedades de reflexión que se encuentran en el interior del follaje. El modelo propuesto se basa en las ecuaciones de balance de energía expresadas por el follaje y el suelo. Los autores tomaron en cuenta la transferencia de masa en las propiedades térmicas y evapotranspiración, añadieron la ecuación de balance de agua al modelo y realizaron una simulación numérica. En otro estudio, Sheng *et al.* (2011) realizaron un diseño integrado de techo sostenible, esto incluye la reinversión de las funciones de los techos, tales como techos verdes, captación de aguas pluviales y generación de energía fotovoltaica. Los beneficios que ellos consideraron son: el aumento de la temperatura debido a la generación fotovoltaica de energía térmica se puede compensar con el techo verde, la energía térmica generada por la energía fotovoltaica puede usarse para operar el sistema de riego, la contaminación del agua de lluvia se puede limpiar por medio del techo verde y mejorar la calidad del agua de lluvia y la recogida de agua de lluvia se puede utilizar para el riego de techo verde durante tiempo de temperaturas altas. Por su parte, Tabares-Velasco y Srebric (2012) propusieron un modelo en donde consideran los procesos de transferencia de calor y masa entre la atmósfera, las plantas y el sustrato. El modelo fue validado con datos experimentales que se componen de la temperatura de la superficie, flujo de calor por conducción, flujo de calor por convección, radiación neta y evapotranspiración. La validación del modelo muestra que predice la transferencia de calor y masa con exactitud, más sin embargo subestima las tasas máximas de evapotranspiración. En ese mismo año, Jaffal *et al.* (2012) proponen un modelo de comportamiento térmico de techo verde, con un código de construcción para permitir la evaluación del follaje de techo verde y las temperaturas superficiales del suelo. Las simulaciones se llevaron a cabo para una casa unifamiliar con techos convencionales y verdes en un clima templado francés, con ello encontraron que la demanda de energía anual se redujo en un 6%. Concluyeron que los techos verdes son térmicamente beneficiosos para los climas templado, caliente y frío de Europa.

En una investigación reciente, Ghassem-Arash (2015) realizaron una simulación numérica del rendimiento de un techo verde a través de la solución de un modelo de

techo verde a través de un sistema complejo acoplado de ecuaciones diferenciales de la transferencia de calor y masa que toma en cuenta cuatro elementos: aire, vegetación, sustrato y estructura del techo, de forma simultánea, las ecuaciones fueron discretizadas con un método de diferencias finitas. Así mismo, compararon un techo verde con uno de concreto encontrando que el techo verde permite una reducción de 77% en el *flux* de calor.

Desempeño térmico y estimación de parámetros termofísicos

Para la implementación de un modelo matemático es necesario predecir propiedades físicas y térmicas, así como contar con mediciones experimentales confiables de las variables del proceso. Con respecto a la predicción de propiedades, Ondimu y Murase (2007) publicaron métodos para predecir la conductividad de materiales comúnmente empleados en la construcción de techos ecológicos. Por su parte, Sailor *et al.* (2008) proporciona valores experimentales de la conductividad térmica, capacidad calorífica, emisividad térmica y reflexividad de onda corta (albedo) de diferentes tipos de suelo. En el estudio de Ouldboukhitine y Belarbi (2015), se caracterizaron tres propiedades físicas claves en un techo verde, las propiedades termo físicas tales como la conductividad térmica del sustrato, la capacidad de campo, la resistencia térmica de techos verdes en condiciones de clima controlado.

Los techos verdes integran vegetación en su infraestructura para alcanzar beneficios que minimizan el impacto negativo de la urbanización, estos usan suelos artificiales (sustratos) que tienen un desempeño mejorado comparado a los suelos naturales. Sandoval *et al.* (2015) caracterizaron cuatro sustratos en términos de sus propiedades hidráulicas y térmicas, y el desempeño de la simulación numérica del flujo de calor y de masa para estudiar el efecto de estas propiedades sobre el desempeño del techo verde como sistema para reducir las escorrentías de agua pluvial. Los resultados de la simulación muestran que el comportamiento térmico depende de las propiedades del sustrato y del contenido de humedad anterior a una tormenta, destacando la necesidad de modelos dinámicos biofísicos para diseño y mantenimiento de techos verdes.

En la literatura especializada se encuentran publicados diversos trabajos experimentales sobre techos ecológicos. Hien *et al.* (2007) midieron parámetros importantes en un techo ecológico localizado en Singapur, Indonesia. Sus mediciones indican diferencias de temperatura de 18°C entre la temperatura exterior del techo y la temperatura del aire al interior del edificio, aunque debe seleccionarse adecuadamente el sustrato del techo ecológico ya que ciertos sustratos poseen mayor capacidad térmica que un techo convencional. Además, el 60% del *flux* de calor hacia el edificio fue reducido por la instalación del techo ecológico. Los autores demostraron que la temperatura y humedad en el techo ecológico podría mantenerse en niveles convenientes seleccionando apropiadamente a las especies que integran la capa de vegetación. Simmons *et al.* (2008) compararon seis diseños diferentes de techos extensivos empleando plantas nativas de Texas, EUA. Los resultados indicaron que los perfiles térmico e hidrológico dependen del diseño del techo. Con respecto al perfil térmico, en todos los diseños analizados se obtuvieron diferencias de temperatura hasta de 20°C. En referencia al perfil hidrológico, los techos ecológicos fueron capaces de retener entre 44 y 88% de la precipitación total de un evento pluvial, aunque la capacidad de retención fue una función del diseño y de la cantidad de agua pluvial en cada evento. Por su parte, Spala *et al.* (2008) estudiaron diversos casos de instalación de techos y los criterios para la selección de las especies que formaron parte de la capa de vegetación. Los autores examinaron la eficiencia energética del empleo de un techo ecológico encontrando que reduce hasta el 40% del consumo en energía eléctrica necesario para enfriar un edificio durante el verano, aunque no reduce sustancialmente el consumo de energía necesario para calentar el mismo edificio durante el invierno. A nivel regional, Ordóñez y Pérez (2015) compararon el desempeño térmico de los sistemas de techo verde y techo blanco (techo que ha sido preparado para reflejar una parte sustancial de la radiación solar con el objeto de reducir la transferencia de calor) en un edificio ubicado en Yucatán (México) con la hipótesis de que la degradación en efectividad de los techos blancos por el ambiente haría de los techos verdes una mejor alternativa para el ahorro de energía en edificios. Los autores observaron que los techos verdes tienen una mejor capacidad para reducir las fluctuaciones temporales de temperatura y para favorecer las condiciones de confort térmico hacia el interior del edificio en comparación con los techos blancos.

Desafortunadamente, existen pocas contribuciones científicas que involucren conjuntamente las mediciones experimentales y la implementación de un modelo matemático, la temperatura, humedad, precipitación y radiación solar de un techo ecológico.

Aspectos biológicos y ecológicos de un techo verde

Como se comentó anteriormente, además de la capacidad para reducir el *flux* de calor al interior de los edificios, los techos verdes poseen otros beneficios ambientales y ecológicos. En referencia a la capacidad de los techos verdes para reducir las escorrentías pluviales, Mentens *et al.* (2006) estudiaron la capacidad de captación de agua pluvial encontrando que bastaría un 10% de edificios provistos de techos ecológicos para disminuir hasta el 54% de las escorrentías urbanas de Bruselas, Bélgica. Por su parte, Spolek *et al.* (2008) reportaron información recolectada a través del monitoreo de dos techos ecológicos localizados en Portland, EUA, durante tres años consecutivos. Sus resultados indican que los techos ecológicos fueron capaces de reducir la descarga de agua de lluvia entre un 12 y 25%. En otro estudio relacionado, Bliss *et al.* (2009) encontraron una disminución de hasta un 70% en las escorrentías de un techo ecológico prototipo localizado en Pittsburg, EUA.

Así mismo, los techos verdes han demostrado ser eficientes para reducir niveles de ruido. Al respecto Por su parte, las contribuciones de Van Renterghem y Botteldooren (2008, 2009) se dirigieron al estudio del efecto de la propagación del sonido en techos ecológicos. Los autores encontraron que techos ecológicos extensivos con profundidades de 15 a 20 cm son capaces de atenuar el ruido de la ciudad hasta en 10 dB. En un estudio similar, Yang *et al.* (2012) estudiaron los efectos acústicos de techos verdes en una estructura a nivel de calle en la parte superior de aparcamientos subterráneos, utilizaron sistemas de techo verde a base de zinc y sustratos de piedra caliza y estudiaron parámetros tales como área, profundidad, tipo y posición del techo verde y el tipo de vegetación. Sus resultados muestran que tales sistemas de techado reducen eficazmente el ruido en lado receptor y que mediante la adición de hojas

podadas solo hay una pequeña reducción de ruido por encima de 4kHz, pero con un tratamiento optimizado podría llegar hasta 4dB(A) de reducción de ruido de tráfico.

Un beneficio adicional de los techos verdes es su capacidad para capturar contaminantes atmosféricos. En este sentido Yang *et al.* (2008) analizaron la remoción de contaminantes atmosféricos en Chicago (EUA) empleando techos ecológicos intensivos. Los autores reconocen la imposibilidad de reemplazar todos los techos convencionales por techos ecológicos, pero consideran que los techos ecológicos son la mejor alternativa para la reducción de la contaminación atmosférica en aquellas situaciones en las que el uso de suelo y los fondos públicos impidan establecer parques y jardines arbolados. Poco después, Currie y Bass (2008) estudiaron la disminución de NO_x, SO_x, CO, PM₁₀ y O₃ al emplear un techo ecológico en la ciudad de Toronto, Canadá. Los autores proponen que un incremento de entre el 10 y 20% del área superficial instalada de techos ecológicos contribuiría significativamente en la salud social, financiera y ambiental de la ciudadanía. En cuanto a las especies utilizadas como cobertura vegetal de los techos ecológicos se presenta una amplia variedad tanto de especies típicamente empleadas, independientemente del sitio de estudio, como de especies nativas. Van Woert *et al.* (2005a, 2005b) realizaron dos estudios usando varias plataformas para techos con la finalidad de cuantificar los efectos de diferentes tratamientos (techo comercial estándar de grava, un sistema de techo verde extensivo sin vegetación y un techo verde extensivo típico con vegetación). Las especies que emplearon fueron *Sedum acre*, *S. album*, *S. kamtschaticum*, *S. pulchellum*, *S. reflexum* y *S. spurium*. En general, el promedio de retención de agua de lluvia fue de 48.7% para el techo de grava y de 82% para el techo con vegetación. La presencia de vegetación no sólo redujo la escorrentía, sino que extendió su duración en un periodo de tiempo más allá del evento de lluvia evaluado. Monterusso *et al.* (2005) usaron 18 especies nativas y nueve de *Sedum* para su uso en techos verdes en Michigan. Las especies fueron *Sedum acre*, *S. album*, *S. kamtschaticum*, *S. ellacombeanum*, *S. pulchellum*, *S. reflexum* y *S. spurium*, *S. middendorffianum*, *S. spurium*, *Agastache fieniculum*, *Allium cernuum*, *Aster laevis*, *Coreopsis lanceolata*, *Fragaria virginiana*, *Juncus effusus*, *Koeleria macrantha*, *Liatris áspera*, *Monarda fistulosa*, *Monarda punctata*, *Opuntia humifosa*, *Petalostemon*

purpureum, *Potentilla anserina*, *Rudbeckia hirta*, *Schizachyrium scoparium*, *Solidago rigida*, *Sporobolus heterolepsis*, *Tradescantia ohiensis*. Se evaluó el crecimiento, sobrevivencia durante el establecimiento en el techo y al invierno, así como la apariencia visual durante tres años. Todas las especies de *Sedum* spp fueron adecuadas para su uso en techos verdes. De las 18 especies nativas, *Allium cernuum* L., *Coreopsis lanceolata* L., *Opuntia humifosa* Raf. y *Tradescantia ohiensis* L., son adecuadas para su uso en techos verdes extensivos sin riego. Estudios realizados por Boivin *et al.* (2001) emplearon *Ajuga reptans*, *Arenaria verna* 'Aurea', *Armeria maritime*, *Draba aizoides*, *Gypsophila repens* y *Sedum xhybridum* para evaluar el efecto de tres profundidades del sustrato sobre la lesión por baja temperatura. Los resultados indicaron que las plantas tienen diferente resistencia a las condiciones invernales. En un estudio reciente, Gabrych *et al.* (2016) afirman que el uso de techos verdes se está incrementando para mejorar la regulación del micro-clima en áreas residenciales, ellos inventariaron la vegetación instalada sobre 51 techos verdes en el área metropolitana de Helsinki (Finlandia) encontrando 230 especies vegetales. Ellos demostraron que la profundidad del sustrato y la edad del techo son predominantes en la estructura de la comunidad vegetal, esto es, sustratos delgados y techos jóvenes albergaron a especies del género *sedum* así como musgos, mientras que en sustratos profundos y techos antiguos predominaron especies herbáceas.

A nivel regional, Ordoñez *et al.* (2012) sugieren las especies *Kalanchoe gastonis bonnieri*, *Comelina repens*, *Portulaca pilosa*, *Portulaca umbraticola*, *Briophyllum pinnatum*, *Portulaca grandiflora* y *Kalanchoe fedtschenkoi purple*, esto debido a pruebas realizadas durante un período de 180 días en Yucatán (México). El estudio incluyó el análisis de sobrevivencia de organismos considerando los sustratos y el crecimiento de la cobertura. Por otro lado, Cruz y Córdova (2013) realizaron experimentos para la selección de especies vegetales potenciales para la instalación en techos verdes bajo condiciones de clima tropical húmedo. Para esto, ellos estudiaron la adaptabilidad de las especies *Cyperus ligularis*, *Tradescantia spathacea*, *Tradescantia pallida* y *Tradescantia zebrina* concluyendo que las especies *T. pallida* y *T. spathacea* lograron mayor adaptación a la época de lluvias intensas y al periodo de estiaje. Adicionalmente, Canul (2014)

evaluó el efecto de las condiciones ambientales sobre el establecimiento y crecimiento de especies nativas (*C. ligularis*, *T. pallida* y *T. spathacea*) en una unidad experimental de techo verde tipo extensivo, localizada en Villahermosa, Tabasco (con clima cálido húmedo, con abundantes lluvias en verano). Acorde a estos análisis obtuvo que las tres especies se establecieron y crecieron en la unidad experimental de manera satisfactoria, *T. spathacea* presentó un crecimiento similar a *T. pallida*, mientras que *C. ligularis*.

Estudios de ahorro energético en techos verdes

Con respecto a investigaciones sobre el beneficio de ahorro energético producido por la instalación de techos verdes, Spolek *et al.* (2008) reportaron información recolectada a través del monitoreo de dos techos ecológicos establecidos en Portland (EUA), durante tres años consecutivos, en este tiempo estimaron que la reducción del *flux* de calor osciló entre 13% en invierno, y 72% en verano indicando notablemente la importancia del techo ecológico en el ahorro de energía, especialmente en la temporada de calor.

Un balance de calor dentro de un edificio permite estimar el ahorro en consumo energético en función de las condiciones meteorológicas y climatológicas que ocurren durante el año. Clark *et al.* (2008) propusieron un modelo económico donde integraron los beneficios del techo ecológico tales como captación de agua pluvial, ahorro de energía y reducción de la contaminación atmosférica. Empleando este modelo, los autores encontraron una disminución de entre 20 y 25% del valor presente neto en el empleo de techos ecológicos con respecto a techos convencionales considerando un tiempo de vida media de 40 años. Además, durante este tiempo de vida media, el techo ecológico es capaz de ahorrar entre 1 700 y 6 400 dólares estadounidenses anuales por tonelada de reducción de NO_x. Considerando este beneficio ambiental, la disminución total del valor presente neto osciló entre 25 y 40%. Martens *et al.* (2008) estudiaron el efecto de la relación techo/cobertura en edificios de 1 a 3 pisos. Ellos encontraron que los mayores ahorros energéticos ocurren en edificio de un solo piso en los cuales se alcanzaron ahorros del 73% de la energía necesaria para acondicionamiento de aire en un verano típico de Toronto, Canadá.

Recientemente, Fuentes-Velasco (2014) realizó simulaciones de energía en edificios residenciales estimando decrementos entre el 6.5% y el 15% en el consumo de energía eléctrica anual, lo que, de acuerdo con las tarifas regionales de energía eléctrica, se traducen en un ahorro económico del 9.5% al 19.6% en el gasto anual. Estos ahorros sugieren que, si el techo verde fuese empleado como una ecotecnología a gran escala, podría representar un ahorro importante de energía eléctrica en las viviendas que cuenten con sistemas de aire acondicionado, así como un beneficio al ahorro familiar, cuyos resultados indican que los techos verdes son una alternativa para reducir el consumo de energía eléctrica en el estado de Tabasco, que además aportarían un valor ecológico y social asociado a sus múltiples beneficios.

En otro estudio relacionado, Karachaliou *et al.* (2015) investigaron el efecto de un techo verde intensivo compuesto por plantas aromáticas indígenas (16,000 plantas mediterráneas de al menos 14 especies) con baja necesidad de irrigación, instalado sobre un edificio de 10000 m² completamente aislado, localizado en Atenas (Grecia). Ellos analizaron el comportamiento térmico y la eficiencia energética del edificio encontrándose que la temperatura promedio de la superficie del techo verde es 15 °C menor a la temperatura de un techo convencional. Recientemente, Silva *et al.* (2016) evaluó el comportamiento térmico de un techo verde en Lisboa (Portugal) durante los periodos de frío y calor en el año 2013. Los resultados de este experimento se usaron para calibrar la simulación energética del edificio con EnergyPlus. Después, se validó el modelo numérico usado para comparar el ahorro energético de techos intensivos, semi-intensivos y extensivos. Los tres tipos de techos verdes sugieren una energía de calefacción similar, aunque los techos verdes extensivos muestran mayor capacidad de enfriamiento, de 2.8 a 5.9 veces más que los semi-intensivos y los intensivos, respectivamente.

Costos de instalación de un techo verde extensivo

En cuanto a costos para instalación de un techo verde, Saiz (2004) en su análisis de costo de techos verdes en una zona residencial de edificios en Madrid estimó un ahorro neto de 14.6% en relación con un techo común, a pesar de que inicialmente

la inversión fue 36% mayor para el techo verde en comparación a la inversión del techo común. Carter y Keeler (2008) compararon los costos de instalación para un techo tradicional y un techo verde, estimando que de acuerdo con el Valor Presente Neto (VPN) un techo verde es entre un 10% a 14% más caro que un techo tradicional. Sin embargo, los autores estimaron que una reducción del 20% en los costos de construcción haría que el VPN de un techo verde fuera menor que el VPN de un techo tradicional. Por su parte, Hong *et al.* (2012) calcularon el costo de construcción por tipo de sistema de techos verdes, con la asistencia de una compañía en el ramo consideraron que el costo de construcción fue de USD 173.5 por m² de árboles, USD 149.48 por m² de arbustos, USD 135.24 por m² de arbustos bajos, USD 129.02 por *Sedum*, y USD 110.33 por plantas. Así, se decidieron que las plantas crecerían sobre un suelo natural, el cual es un tipo de sistema de techo verde relativamente económico. Según reportes de la EPA (2008b) el costo de los techos verdes varía de acuerdo con diferentes características como son: tipo de membrana, sistema de drenaje, cercado, tipo y cantidad de plantas. De acuerdo con el reporte, en 2001 se estimó que el costo inicial de un techo verde extensivo es de USD 107 por m² y USD 269 por m² para techos intensivos. Otras estimaciones suponen un intervalo entre USD 161 a USD 215 por m². El costo en Alemania, donde los techos verdes son más comunes, oscila entre USD 86 y 161 por m².

Justificación

Como consecuencia del incremento en el consumo de energía eléctrica que se ha previsto en un 53% para el año 2030, se requieren de alternativas para el aseguramiento de la sustentabilidad energética. El mejoramiento de la eficiencia energética es el paso inicial para alcanzar la sustentabilidad ya que es una tecnología más barata, más rápida de implementar y más amigable con el ambiente comparada con las nuevas tecnologías basadas en fuentes renovables que requieren de mayor inversión de recursos e infraestructura para la investigación y consolidación de estas.

Una buena medida para mejorar la eficiencia energética son los techos ecológicos. En diversos lugares del mundo se usan con esta finalidad y se han hecho populares en Europa durante las últimas décadas, ahora son más familiares para Norteamérica donde en algunas ciudades se han implementado proyectos piloto de techo verde y se han aprobado incentivos para quienes los usen e incluso se ha exigido en algunas zonas. En cuanto a México se refiere, los techos verdes se conocen como azoteas verdes, aunque hay poca información sobre ellos. En la azotea del edificio del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT) en el sur de la ciudad de México, se encuentra la azotea verde más grande de Latinoamérica. Como es de notarse los lugares donde se han implementado los techos verdes, incluyendo México no están relacionados con el análisis del balance de calor operando bajo condiciones de clima tropical húmedo, regiones en las que el uso de energía eléctrica y sus costos son altos, debido a las temperaturas tan elevadas la mayor parte del año y su disminución por medio del uso de aire acondicionado en edificios y viviendas en gran parte de la región. En este estudio se propone evaluar el desempeño de un techo ecológico en una región tropical cuya función primordial es la disminución del consumo en energía eléctrica a partir del empleo de un modelo matemático de predicción que hará uso de una base de datos asegurada a partir de estudios previos. En dichos estudios se establecieron sobre el techo verde, algunas especies de los géneros *Tradescantia* y *Cyperus*. Estas especies son nativas del sureste mexicano por lo que se asegura la sobrevivencia de estas bajo fluctuaciones abruptas de temperatura, resistencia a la sequía y además requieren de poco mantenimiento con respecto al riego y fertilización. Además, el estudio contempla la generación de un análisis económico para establecer la relación costo-beneficio de la instalación de un techo ecológico en regiones con clima cálido-húmedo. Finalmente, esta investigación aspira a establecer bases técnicas para la construcción de techos ecológicos empleando especies nativas, impulsar la sustentabilidad energética en los sectores doméstico, comercial y turístico, y demostrar que la instalación puede ser muy económica, sencilla y ecológicamente amigable.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la reducción del consumo de energía eléctrica en edificios residenciales en zonas urbanas con clima tropical húmedo a partir de la estimación de la ganancia térmica empleando un modelo matemático del balance de calor.

Objetivos particulares

1. Formular un modelo matemático para el balance de calor en un techo verde reconociendo la naturaleza diferente de los estratos o capas que componen al mismo.
2. Aplicar un análisis de sensibilidad al modelo matemático para conocer el efecto de los parámetros con mayor incertidumbre sobre la predicción del *flux* de calor.
3. Realizar un análisis económico que incluya el costo de inversión, de operación y mantenimiento, así como el ahorro energético proporcionado.

Hipótesis

De acuerdo con las estimaciones del modelo matemático, el uso de techos verdes en Tabasco, durante la primavera, permitirá una disminución de temperatura entre 10 y 15°C y una disminución del *flux* de calor de al menos 30%.

Materiales y métodos

Diseño de la unidad experimental

La unidad experimental del techo ecológico está situada en las instalaciones de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tabasco, localizada en las coordenadas 17°59'27" N, 92°58'22" W a una altitud de 11 msnm, en el municipio de Centro, en las inmediaciones de la ciudad de Villahermosa. El tipo de clima es tropical húmedo con temperaturas máximas normales de 35.4 y 28.2 °C, para mayo y enero respectivamente, y las temperaturas mínimas normales fueron de 24.4 y 19.4 °C, para los mismos meses del año (información recopilada en 30 años, desde 1971 hasta 2000). En particular, durante el mes de mayo suelen ocurrir temperaturas máximas diarias hasta de 43 °C. Aunque las temperaturas máximas en la región no son superiores a aquéllas alcanzadas en algunas regiones del norte del país, la cantidad considerable de cuerpos de agua poco profundos en el estado de Tabasco resulta en una alta tasa de evaporación, produciendo a su vez valores elevados de humedad relativa en el ambiente durante casi todo el año. Por ello, para la población en general, la sensación de calor en la región es marcadamente superior a la percibida en climas áridos a la misma temperatura ambiente. Con respecto a la precipitación pluvial, la precipitación normal mensual es de 44 mm para el mes de abril y 323 mm para el mes de octubre. La precipitación anual acumulada es de 2010 mm con 129 días del año presentando uno o más eventos pluviales.

La unidad experimental fue equipada con registradores y sensores de temperatura y humedad del aire, temperatura y humedad del sustrato, precipitación pluvial, y radiación solar directa. La diferencia de temperatura entre la parte superior del sustrato y la parte inferior de la unidad (esto es, el fondo del sustrato) ha permitido calcular la disminución

de temperatura que el techo verde (cobertura vegetal más sustrato) fue capaz de producir bajo condiciones del trópico húmedo (Canul Gómez, 2014). La información recopilada en la unidad experimental permitirá proponer *fluxes* de calor (y que se traducen en diferencias de temperatura) hacia el interior de un edificio como función de la época del año y las condiciones meteorológicas típicas de la región, mismos que fueron utilizados en los escenarios de simulación de energía en estudios previos (Fuentes Velasco, 2014; Bolívar Fuentes, 2015).

El modelo matemático para el balance de calor

El modelo matemático propuesto será de tipo mecanístico, dinámico y uni-dimensional con respecto a la coordenada vertical del techo ecológico. El modelo estará basado en las suposiciones planteadas en el trabajo de Palomo del Barrio (1998) y revisadas por Alexandri y Jones (2007). El modelo consistirá en un balance de calor en los tres componentes principales de un techo ecológico: soporte estructural (membranas y barreras de raíces), sustrato de crecimiento y cobertura vegetal. La transferencia de masa y energía estará representada por los mecanismos pertinentes y el modelo será capaz de representar y predecir apropiadamente a las principales variables de estado en función del componente del techo como se indica a continuación:

- i) *Soporte estructural*. El soporte estructural está conformado por el material de construcción empleado para la base del techo (madera de alta resistencia), así como por las diversas capas de revestimiento, aislamiento, protección de raíces y el sistema de drenaje. La transferencia de energía es el fenómeno de transporte más importante ya que se ha supuesto que no existe infiltración alguna de líquidos o gases, a excepción del efecto del contenido de humedad de la base de madera del techo, un efecto muy importante en climas tropicales húmedos. Como resultado, el soporte estructural será representado por dos ecuaciones diferenciales parciales (en función del tiempo t y la dirección vertical z): la primera de ellas para el perfil de la temperatura del soporte y la segunda para el perfil del contenido de humedad en la capa externa del soporte (la base de madera).

- ii) *Sustrato de crecimiento*. El sustrato de crecimiento es una mezcla de turba y composta de jardín. Debido a esto, el sustrato de crecimiento es un medio poroso donde coexisten tres fases: la fase sólida, la fase líquida (agua libre) y la fase gaseosa (aire húmedo). Debido a las condiciones húmedas de la región, la transferencia de calor en el sustrato de crecimiento es una función de la humedad relativa del suelo que a su vez determina el valor de la conductividad térmica del mismo. Por ello, debe considerarse el potencial de humedad del sustrato como una ecuación adicional a la ecuación diferencial parcial de transferencia de calor en el sustrato. Así mismo, debe considerarse el contenido de humedad del suelo como una ecuación diferencial parcial de la transferencia de masa. En esencia, el sustrato de crecimiento será modelado por tres ecuaciones: transferencia de calor (perfil de temperatura) transferencia de masa (perfil de humedad) y el potencial de humedad.
- iii) *Cobertura vegetal*. En la cobertura vegetal se reconocen los siguientes mecanismos de transferencia de masa y calor: radiación solar absorbida por la cobertura vegetal, intercambio de radiación de onda corta entre la cobertura vegetal y la atmósfera, transferencia de calor por convección entre la cobertura vegetal y el sustrato con el aire que los rodea, evapo-transpiración de la cobertura vegetal, evaporación-condensación de vapor de agua en la superficie del suelo, así como su transporte convectivo.

Para el acoplamiento de las ecuaciones que describen a los tres componentes del techo ecológico que serán modelados matemáticamente, se requiere la selección de condiciones de frontera apropiadas basadas en suposiciones razonables y en la Ecuación de Continuidad. En el caso de las condiciones de frontera externas, éstas serán determinadas, en gran medida, por el conocimiento del entorno. Con respecto a los métodos numéricos se propone el empleo del método de diferencias finitas, el cual es de implementación directa dado que se considerará que la geometría del techo ecológico es regular. Sin embargo, el método de diferencias finitas puede generalizarse a techos verdes con geometría irregular a partir de la introducción de un método de diferencias finitas elástico para dominios irregulares (ver, por ejemplo, Oprsal y Zahradnik, 1999). La

discretización de las ecuaciones a partir del método de diferencias finitas generará un sistema de ecuaciones que puede resolverse por una técnica iterativa como el Método de Newton. En caso de que el método de Newton no sea eficiente, se implementará un Método de Cuasi-Newton (Broyden) o de Gradiente Conjugado. El lenguaje de programación seleccionado es *Visual Basic for Applications* y la interfaz gráfica de usuario será creada como un complemento (*Add in*) de Microsoft Excel®.

Una vez que el programa haya sido implementado, el modelo matemático será validado con la información experimental recopilada durante un año de monitoreo del techo ecológico. Dado que algunos parámetros físicos del modelo presentan incertidumbres para su cuantificación, se realizará un análisis de sensibilidad paramétrica para estimar el efecto de dichos parámetros en las predicciones globales del modelo. El modelo matemático será empleado para simulación de los diferentes escenarios seleccionados en el análisis económico para estimar el *flux* de calor hacia el interior de un edificio en estudio.

El análisis económico

El análisis económico será obtenido siguiendo el método originalmente propuesto por Melnick (1958) y que ha sido modificado y adaptado a las condiciones actuales (nuevas tecnologías, instrumentos, procedimientos, normas, políticas económicas vigentes) tal y como se establece en Woodward (1997), Blank y Tarquin (2011), Munier (2013) y Sholarin y Awange (2016).

Para realizar un análisis económico se deben considerar las siguientes etapas: 1) el análisis de factibilidad técnica, 2) el análisis de viabilidad económico-financiera y 3) el análisis beneficio-costos. El análisis de factibilidad técnica se refiere a la selección y descripción del proceso de construcción e instalación del techo, la selección y especificación de materiales, la infraestructura requerida, el suministro de materias primas e insumos y la identificación de residuos, efluentes y emisiones generados durante la operación, así como efectos del proyecto, beneficiarios y perjudicados (efectos directos, efectos indirectos, externalidades y efectos intangibles). Por su parte, el análisis

de viabilidad económico-financiera está constituido por un análisis de la inversión, un análisis de activos fijos, el capital de trabajo, plan de inversiones, el cronograma de inversiones, los egresos e ingresos, costos de operación y mantenimiento (reemplazo de materiales, irrigación, poda, fertilización), los costos administrativos y de logística, la depreciación y amortización, el agotamiento de recursos naturales, los costos de remediación y control de la contaminación, así como los ingresos por ventas. Finalmente, el análisis beneficio-coste estará basado en diversos indicadores de rentabilidad, de los cuales los más importantes son el valor presente neto, la tasa interna de retorno y el periodo de recuperación de la inversión.

Presupuesto

Este proyecto de tesis estará inicialmente financiado a través del Proyecto PFI No. UJAT-2015-IB-24 en el que el Dr. José Roberto Hernández Barajas es un colaborador. Sin embargo, debido a la *naturaleza teórica-numérica* de esta investigación, no se requiere de gastos para materiales, reactivos o equipos de laboratorio y de análisis. Los implementos para el trabajo numérico ya se encuentran disponibles tales como 4 estaciones de trabajo de alta velocidad DELL Precision 490 y T7400 con 8 núcleos de procesamiento y 32 GB en RAM, así como las licencias de software de análisis numérico y estocástico tales como *Solver Pro®* y *SigmaPlot v12*.

Finalmente, la base de datos experimentales del desempeño térmico de un techo verde extensivo bajo condiciones de clima de trópico húmedo ya ha sido asegurada a través de investigaciones de tesis del Cuerpo Académico de Evaluación y Tecnología Ambiental (Cruz y Córdova, 2013; Canul Gómez, 2014; Fuentes Velasco, 2014; Bolívar Fuentes, 2015). En el futuro cercano, se participará en convocatorias de fondos de investigación para obtener el financiamiento necesario para la realización de las estancias de investigación y la difusión de resultados.

Referencias

- Alexandri E, Jones P. 2007. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment* 42: 2835–2849.
- Alexandri E, Jones P. 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment* 43: 480–493.
- Blank LT, Tarquin AJ. 2011. *Engineering Economy*, Seventh edition, Mc Graw-Hill Education, USA.
- Bliss DJ, Neufeld RD, Ries RJ. 2009. Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. *Environmental Engineering Science* 26(2): 407–417.
- Boivin M, Lamy M., Gosselin A, Dansereau, B. 2001. Effect of artificial substrate depth on freezing injury of six herbaceous perennials grown in a green roof system. *HortTechnology*, 11(3): 409–412.
- Bolívar Fuentes RC. 2015. *Análisis del ciclo de vida de un techo ecológico como tecnología para el ahorro energético en pequeños inmuebles bajo condiciones de clima tropical húmedo*, Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, México.
- Canul Gómez, WA. 2014. *Efecto de las Condiciones Ambientales Sobre el Establecimiento y Crecimiento de Especies Nativas en un Techo Verde*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, México.
- Carter T, Keeler A. 2008. Life-cycle Cost–Benefit Analysis of Extensive Vegetated Roof Systems. *Journal of Environmental Management* 87 (2008) 350–363.
- Clark C, Adriaens P, Talbot B. 2008. Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits. *Environmental Science and Technology* 42: 2155–2161.
- Cruz N.A., Córdova E.A. 2013. *Efecto del Sustrato sobre el Crecimiento de Especies Tropicales para su uso Potencial en Techos Verdes*. Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, México.

- Currie BA, Bass B. 2008. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems* 11: 409–422.
- EPA, United States Environmental Protection Agency. 2008a. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies: Urban Heat Island Basics*. Climate Protection Partnership Division in the USEPA's Office of Atmospheric Programs.
- EPA, United States Environmental Protection Agency. 2008b. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies: Green Roofs*. Climate Protection Partnership Division in the USEPA's Office of Atmospheric Programs.
- 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 clima tropical húmedo*, Tesis de Licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, México.
- Ghassem H, Arash E. 2015. Numerical simulation of the dual effect of green roof thermal performance. *Energy Conversion and Management* 106:1418–1425.
- Hien WN, Yok TP, Yu C. 2007. Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment* 42: 25–54.
- Hong T, Kim J, Koo Ch. 2012. LCC and LCCO₂ Analysis of Green Roofs in Elementary Schools with Energy Saving Measures. *Energy and Buildings* 45: 229–239.
- Jaffal I, Ouldboukhitine S-E, Belarbi R. 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43: 157–164
- Jáuregui, E. 2004. *La variabilidad climática en los registros instrumentales de México*. En: Cambio Climático. Una visión desde México. Martínez J y Fernández Bremauntz A (compiladores). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Ciudad de México, México.
- Kumar R, Kaushik SC. 2005. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment* 40: 1505–1511.
- Lazzarin RM, Castellotti F, Busato F. 2005. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings* 37: 1260–1267.
- Li W.C., Yeung K.K.A. 2014. A comprehensive study of green roof performance from an environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment* 3: 127–134.

- Lundholm JT, Peck SW. 2008. Introduction: Frontiers of green roof ecology. *Urban Ecosystems* 11: 335–337.
- Martens R, Bass B, Saiz-Alcazar S. 2008. Roof–envelope ratio impact on green roof energy performance. *Urban Ecosystems* 11, 399–408.
- Melnick, J. 1958. Manual de Proyectos de Desarrollo Económico. Organización de las Naciones Unidas, Programa CEPAL/AAT.
- Mentens J, Raes D, Hermy M. 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77: 217–226.
- Monterusso M., Rowe B, Rugh C. 2005. Establishment and persistence of *Sedum* spp and native taxa for green roof applications. *HortScience*, 40 (2):391–396.
- Munier N. 2013. *Project Management for Environmental, Construction and Manufacturing Engineers: A Manual for putting Theory in Practice*. Springer. USA.
- OECD, 2007. Contribution to the United Nations Commission on Sustainable Development 15. *Energy for Sustainable Development*.
- OECD, 2010. Interim Report of the Green Growth Strategy: Implementing our commitment for a sustainable future. *Meeting of the OECD Council at Ministerial Level: 27–28*.
- Ondimu SN, Murase H. 2007. Combining Galerkin Methods and Neural Network Analysis to Inversely Determine Thermal Conductivity of Living Green Roof Materials. *Biosystems Engineering* 96(4): 541–550.
- Oprsal, I., Zahradnik, J. 1999. Elastic finite-difference method for irregular grids, *Geophysics* 64(1): 240–250.
- Ordóñez E, Zetina C, Pérez M. 2012. Sobrevivencia y cobertura de plantas en techos verdes durante el estiaje en Yucatán. *Ingeniería*, vol. 16, núm. 2, mayo-agosto, 2012, pp. 93–107.
- Ordóñez E, Pérez M. 2015. Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR. *Acta Universitaria*, 25(5), 11-19.
- Ouldboukhitine S, Belarbi R, Jaffal I, Trabelsi A. 2011. Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment* 46: 2624–2631.

- Palomo del Barrio, E. 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings* 27: 179–193.
- Peck S, Kuhn M. 2003. *Design Guidelines for Green Roofs*. Ontario Association of Architects (OAA) and Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC).
- Sailor DJ. 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40: 1466–1478.
- Sailor DJ, Hutchinson D, Bokovoy L. 2008. Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. *Energy and Buildings* 40: 1246–1251.
- Saiz S. 2004. *Greening the Dwelling: A Life Cycle Energy Analysis of Green Roofs in Residential Buildings*. Tesis de Maestría en Ciencias Aplicadas. Universidad de Toronto.
- Sandoval V, Suárez F, Vera S, Pinto C, Victorero F, Bonilla C, Gironás J, Bustamante W, Rojas V, Pastén P. 2015. Impact of the properties of a green roof substrate on its hydraulic and thermal behavior. *Energy Procedia* 78: 1177–1182.
- SENER. 2014. *Datos Estadísticos del Sistema de Información Energética*, Secretaría de Energía, Sistema de Información Energética, Subsecretaría de Electricidad, recurso electrónico: <http://www.sener.gob.mx>, último acceso 9 de mayo de 2016.
- Sheng LX, Mari TS, Ariffin ARM, Hussein H. 2011. Integrated sustainable roof design. *Procedia Engineering* 21: 846–852.
- Sholarin E, Awange J. 2016. *Environmental Project Management. Principles, methodologies and processes*. Springer.
- Simmons MT, Gardiner B, Windhager S, Tinsley J. 2008. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems* 11: 339–348.
- Spala A, Bagiorgas HS, Assimakopoulos MN, Kalavrouziotis J, Matthopoulos D, Mihalakakou G. 2008. On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy* 33: 173–177.
- Spolek G. 2008. Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. *Urban Ecosystems* 11: 349–359.

- Tabares-Velasco PC, Srebric J. 2012. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. *Building and Environment* 49: 310–323.
- The World Bank Group, Climate Change Knowledge Portal, 2012. Fuente electrónica (en línea): <http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm>
- Van Renterghem T, Botteldooren D. 2008. Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. *Journal of Sound and Vibration* 317: 781–799.
- Van Renterghem T, Botteldooren D. 2009. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment* 44: 1081–1087.
- Van Woert N, Rowe D, Andresen J, Rugh C, Fernández T, Xiao, L. 2005a. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality* 34:1036–1044.
- Van Woert N, Rowe D, Andresen J, Rugh C, Xiao L. 2005b. Watering regime and green roof substrate design affect *Sedum* plant growth. *HortScience* 40(3):659–664.
- Woodward DG. 1997. Life cycle costing theory, information, acquisition and application. *International Journal of Project Management* 15: 335–344.
- Yang HS, Kang J, Choi MS. 2012. Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. *Building and Environment* 50: 44–55.
- Yang J, Yu Q, Gong P. 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment* 42: 7266–7273.

CAPÍTULO 2

Análisis Beneficio-Costo de la Instalación de Techos Verdes Extensivos en Condiciones de Trópico Húmedo

ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO DE LA INSTALACIÓN DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS EN CONDICIONES DE TRÓPICO HÚMEDO

Adriana de la Cruz Uribe, Miguel Ángel Jesús Castañeda, Rosa Cristina Bolívar

Fuentes, José Ramón Laines Canepa, José Roberto Hernández Barajas

Resumen:

En este estudio se analizó la rentabilidad del proyecto de instalación de techos verdes extensivos en viviendas ubicadas en un clima tropical húmedo considerando el efecto de diversos parámetros sobre la relación beneficio-costos y el periodo de recuperación de la inversión. Los beneficios ambientales que brinda un techo verde fueron estimados a partir de un análisis de ciclo de vida mientras que un análisis de costos unitarios permitió determinar el efecto de la disponibilidad de materiales sobre los costos de instalación. El análisis a partir del valor presente neto de los costos de instalación, mantenimiento, desmantelamiento y disposición final determinó que la relación beneficio-costos varía entre 1.1 y 3.8 con periodos de recuperación de 3.4 a 8.9 años, en función de la disponibilidad de materiales, los indicadores económicos, las acciones de mantenimiento y la recompensa potencial con bonos de carbono al propietario. Aunque en este estudio se ha considerado únicamente la monetización de dos beneficios ambientales, el ahorro de energía eléctrica y la no emisión o captura de carbono, se reconoce la importancia de valorar otros beneficios, tales como el incremento en la vida útil del techo, el aislamiento acústico, el servicio ecosistémico y la mejora en la calidad paisajística urbana, lo que incrementaría considerablemente la rentabilidad de los techos verdes que, combinados con otras tecnologías verdes tales como la captación pluvial y la generación de energía

fotovoltaica, lo convertiría en un sistema sostenible clave para la adaptación y resiliencia urbanas.

Palabras clave: Cambio climático; COVID; inversión; periodo de recuperación; sostenibilidad.

Institución de adscripción de cada autor:

*División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,
Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, 86287, Villahermosa, Tabasco, México.*

Análisis beneficio-costo de techos verdes

Análisis Beneficio-Costo de la Instalación de Techos Verdes Extensivos en Condiciones de Trópico Húmedo

Cost Benefit Analysis of Extensive Green Roofs Installation under Tropic Humid Conditions

*Adriana de la Cruz Uribe, Miguel Ángel Jesús Castañeda, Rosa Cristina Bolívar Fuentes, José Ramón Laines Canepa, José Roberto Hernández Barajas**

División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, 86287, Villahermosa, Tabasco, México.

Resumen

En este estudio se analizó la rentabilidad del proyecto de instalación de techos verdes extensivos en viviendas ubicadas en un clima tropical húmedo considerando el efecto de diversos parámetros sobre la relación beneficio-costo y el periodo de recuperación de la inversión. Los beneficios ambientales que brinda un techo verde fueron estimados a partir de un análisis de ciclo de vida mientras que un análisis de costos unitarios permitió determinar el efecto de la disponibilidad de materiales sobre los costos de instalación. El análisis a partir del valor presente neto de los costos de instalación, mantenimiento, desmantelamiento y disposición final determinó que la relación beneficio-costo varía entre 1.1 y 3.8 con periodos de recuperación de 3.4 a 8.9 años, en función de la disponibilidad de materiales, los indicadores económicos, las acciones de mantenimiento y la recompensa potencial con bonos de carbono al propietario. Aunque en este estudio se ha considerado únicamente la monetización de dos beneficios ambientales, el ahorro de energía eléctrica y la no emisión o captura de carbono, se reconoce la importancia de valorar otros beneficios, tales como el incremento en la vida útil del techo, el aislamiento acústico, el servicio ecosistémico y la mejora en la calidad paisajística urbana, lo que incrementaría considerablemente la rentabilidad de los techos verdes que, combinados

con otras tecnologías verdes tales como la captación pluvial y la generación de energía fotovoltaica, lo convertiría en un sistema sostenible clave para la adaptación y resiliencia urbanas.

Palabras clave: Cambio climático; COVID; inversión; periodo de recuperación; sostenibilidad.

Abstract

In this study, the profitability of extensive green roof installation on houses located in a humid tropical climate was analyzed considering the effect of various parameters on the benefit-cost ratio and the payback period of the investment. A life cycle analysis was used to estimate the environmental benefits of a green roof, while a unit cost analysis was used to determine the effect of the availability of materials on installation costs. The benefit-cost analysis from the net present value of installation, maintenance, demolition, and disposal costs determined that the benefit-cost ratio varies between 1.1 and 3.8 with payback periods of 3.4 to 8.9 years, depending on the availability of materials, economic indicators, maintenance actions, and the potential incentive with carbon credits to the owner. Although this study has only considered the monetization of two environmental benefits: electricity savings and carbon non-emission or sequestration, it recognizes the importance of valuing other benefits, i.e. the increase in the roof lifespan, acoustic insulation, ecosystem services and improvements in urban landscape, that would considerably increase the profitability of green roofs, which, when combined with other green technologies such as rainwater harvesting and photovoltaic power generation, would make it a key sustainable system for urban adaptation and resilience.

Key words: Climate change; COVID; investment; payback period; sustainability.

Introducción

Ante fenómenos como el calentamiento global se estima que las temperaturas de zonas urbanas generalmente irán en ascenso y, con ello, el consumo de energía eléctrica. Tomando como línea base al 2020, se prevé que el consumo de energía incremente

hasta en un 9 % hacia el 2030, especialmente en países emergentes (IEA 2020). Por lo anterior, la promoción del ahorro y la eficiencia energéticas asociada con diversos requerimientos de consumo eléctrico en las actividades humanas puede coadyuvar en la sostenibilidad energética. Al respecto, los techos verdes han sido propuestos como una tecnología pasiva para reducir el consumo de energía en edificios residenciales que emplean equipos de acondicionamiento de aire. Sin embargo, los programas de eficiencia energética suelen carecer de aceptación social, en gran medida por pocas opciones de financiamiento, falta de información y de incentivos apropiados como la reducción o exención de impuestos. En particular, la escasez de estudios específicos sobre los beneficios asociados a la instalación de techos verdes en edificios residenciales en regiones con climas cálidos ha dificultado el uso de esta tecnología. Al respecto, Rasul y Arutla (2020) analizaron el impacto ambiental de techos verdes en edificios de Sídney, Australia, con clima subtropical húmedo. En su estudio concluyeron que los techos extensivos causan menor impacto ambiental debido a la menor cantidad de materiales empleados durante su construcción y mantenimiento. En un estudio reciente, Koroxenidis y Theodosiou (2021) llevaron a cabo un análisis comparativo del ciclo de vida de techos verdes y convencionales en clima mediterráneo encontrando que los techos verdes extensivos generan un ahorro energético de 15 % a 31 %. Con respecto a los costos de instalación, Hong *et al.* (2012) evaluaron los aspectos económicos de la instalación de un techo verde en Hong Kong (China) encontrando que el costo de construcción varía de USD 110 m⁻² a USD 174 m⁻². Por su parte, Manso *et al.* (2021b) reportaron un costo entre EUR 99 m⁻² y EUR 362 m⁻² en función del país y del tipo de techo verde.

El objetivo de esta investigación fue analizar la rentabilidad de la instalación de techos verdes extensivos en viviendas ubicadas en un clima tropical húmedo, caracterizadas por altos consumos de energía debido a la necesidad de acondicionamiento de aire. Para tal propósito se estudió el efecto de diversos parámetros sobre la relación beneficio-costo y el periodo de recuperación de la inversión, tales como los entornos económicos relacionados con la pandemia de la COVID-19 (pre-, durante y post-), dos escenarios de disponibilidad de materiales de construcción, la conveniencia de realizar acciones de mantenimiento por parte del propietario y un beneficio ambiental del techo verde que

podría traducirse en un beneficio económico pero que aún no se encuentra disponible en México, los bonos por la no emisión o por captura de carbono.

Materiales y métodos

Área y objeto de estudio. La ciudad de Villahermosa está situada al sureste de México en las coordenadas 17° 59' 48" Norte, 92° 55' 42" Oeste, donde predomina un clima cálido húmedo con abundantes lluvias (Köppen Am: clima tropical monzónico) con temperaturas máximas normales de 35.4 °C y 27.9 °C, para mayo y enero respectivamente, y temperaturas mínimas normales de 24.5 °C y 19.5 °C, para los mismos meses de acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2022). La precipitación pluvial anual es de 1 972 mm, siendo septiembre el mes más lluvioso, con 324 mm. El estudio fue realizado considerando la instalación hipotética de un techo verde extensivo sobre un edificio residencial en la zona urbana de Villahermosa. Para las estimaciones de impactos ambientales potenciales se propusieron 24 tipos de vivienda, considerando los siguientes factores: Número de niveles habitables (L: 1 y 2), área efectiva de techado (A: 47 y 98 m²), tres niveles de consumo de energía eléctrica en función del número de equipos de acondicionamiento de aire empleados (E: 1, 2 y 3) y tipo de techado (2 tipos, convencional, CR y verde, GR).

Análisis de ciclo de vida. El método para evaluar el impacto ambiental de un proyecto durante todas sus etapas es el análisis de ciclo de vida (LCA, acrónimo en inglés de Life Cycle Assessment) (ISO 14044 2006), el cual se ha utilizado en esta investigación para proveer de información sobre impactos para desarrollar un análisis de beneficio-costos en techos verdes extensivos instalados en clima tropical húmedo, donde se consideraron las etapas de 1) instalación, 2) mantenimiento y reemplazo de materiales, 3) desmantelamiento y 4) disposición final de residuos. El análisis de ciclo de vida aplicado es de tipo *cradle-to-grave* (de la cuna a la tumba) para analizar las implicaciones ambientales de la instalación de un techo verde tipo extensivo en comparación a la instalación de un techo convencional. Para ello se empleó el programa ATHENA Impact

Estimator for Buildings (IE4B), especializado en el análisis de ciclo de vida de edificios y que permite incluir resultados de simulaciones de energía para calcular efectos sobre la operación, permitiendo la toma de decisiones sobre los aspectos térmicos del edificio. IE4B basa la evaluación de impactos de ciclo de vida en la herramienta de la USEPA para la reducción y evaluación de impactos químicos y otros impactos ambientales y de conformidad con la norma ISO21930/31 (USEPA 2012).

El programa IE4B cuenta con un base de datos para el inventario de materiales de acuerdo con los estándares ISO14040/14044 por cada etapa del proyecto. En la Tabla 1 se encuentran los detalles de cada elemento en la etapa de construcción con una descripción breve sobre sus medidas, resistencias, composición de materiales, entre otros. En las etapas de operación y mantenimiento se consideraron los consumos de energía eléctrica y de gas LP, así como los materiales que necesiten reemplazo o mantenimiento.

En la Tabla 2 se presentan 24 tipos de vivienda de acuerdo con su consumo anual de energía eléctrica, de uno o dos niveles, el área de techado y si cuentan con techo convencional o verde.

En el análisis de inventario se definieron los insumos cuantificados de flujos de salida al ambiente. De los impactos ambientales negativos se consideran: *i*) calentamiento global por la emisión de gases de efecto invernadero, *ii*) la acidificación causante de la degradación de metales, materiales de construcción, deforestación y daño a la vida acuática, *iii*) la eutrofización, causada por la descarga de nutrientes que causan un crecimiento excesivo de algas y, *iv*) la producción de smog por la combinación de contaminantes atmosféricos.

Tabla 1. Inventario de los elementos que forman el proyecto en su etapa de construcción.

Elemento	Características
Cimentación	Zapatas de hormigón, de 10 m, con un ancho de 0.8 m, y grosor de 0.3 m.
	Varillas del #14M.
	Hormigón con resistencia de 30 MPa.
	Cemento con 9% de porcentaje de la concentración de cenizas volátiles.
Columnas y trabes	Columnas de 2.9 y 5.9 m para viviendas de uno y dos niveles, respectivamente, con espaciamiento de 3.1 m.
	Trabes con separación de 4 m.
	Carga de vida máxima de 4.8 kPa.
Paredes y muros	De hormigón, con altura de 2.9 m y longitudes variadas.
Puertas y ventanas	Puertas de madera hueca para interior, de acero con 50% de cristal para exterior.
	Ventanas con marco de aluminio y cristal de doble hoja con aislamiento de aire.
	Tres puertas exteriores.
Pisos/niveles	De hormigón. El piso de la primera planta de 47 m ² para la vivienda de un solo nivel y de 98 m ² de área total del techo.
Materiales del techo convencional	De hormigón. De 47 y 98 m ² , con carga de vida de 4.8 kPa y 30 MPa de resistencia del hormigón, 9% de concentración de cenizas volátiles del cemento.
Materiales extra	Del techo verde (Imprimador, grava, barrera de raíces, capa de drenaje)
	Otros (Escaleras de hormigón, losetas y mosaicos)

Costos unitarios y valor presente. Se recopilaron costos unitarios de los materiales necesarios para la instalación de un techo verde extensivo con un área de construcción de 98 m² en octubre de 2022. Los costos unitarios fueron proporcionados por cinco empresas reconocidas a nivel nacional y especializadas en los materiales que conforman las diversas capas de un techo verde extensivo. De los materiales de instalación, la membrana impermeable incide sobre la rentabilidad del proyecto, ya que representa una proporción relevante de los costos y además debe reemplazarse cada 10 años de acuerdo con su tiempo de vida útil. El conjunto de costos unitarios de cada capa de techo verde fue sometido a una prueba de Shapiro-Wilk para constatar si los datos de costos se comportan como una distribución normal, empleando el software estadístico SigmaPlot 14.0. Por su parte, el servicio de mantenimiento es el costo unitario más importante durante la etapa de operación y mantenimiento del techo verde. Cuando el propietario del edificio residencial no realiza las acciones de mantenimiento, debe

contratar a personal de jardinería no especializado. En tal caso, un jardinero percibe honorarios entre MXN 350 y MXN 400 por una jornada de cuatro horas. Por su parte, el costo por diversos insumos tales como fertilizantes, herramientas o refacciones es de MXN 1 150 para el primer año del proyecto y que incrementará en función de la inflación.

Tabla 2. Descripción de los tipos de vivienda residencial en función del consumo de energía eléctrica, número de niveles, área y tipo de techado.

Código del tipo de vivienda	Consumo eléctrico anual (MWh)	Número de niveles	Área de techado (m ²)	Tipo de techado
1L-47A-1E-CR	5.5			
1L-47A-2E-CR	7	1		
1L-47A-3E-CR	10		47	Convencional (CR)
2L-47A-1E-CR	5.5			
2L-47A-2E-CR	7	2		
2L-47A-3E-CR	10			
1L-47A-1E-GR	5.2			
1L-47A-2E-GR	6.4	1		
1L-47A-3E-GR	8.6		47	Verde (GR)
2L-47A-1E-GR	5.2			
2L-47A-2E-GR	6.4	2		
2L-47A-3E-GR	8.6			
1L-98A-1E-CR	9			
1L-98A-2E-CR	12	1		
1L-98A-3E-CR	17		98	Convencional (CR)
2L-98A-1E-CR	9			
2L-98A-2E-CR	12	2		
2L-98A-3E-CR	17			
1L-98A-1E-GR	8.3			
1L-98A-2E-GR	10.8	1		
1L-98A-3E-GR	14.3		98	Verde (GR)
2L-98A-1E-GR	8.3			
2L-98A-2E-GR	10.8	2		
2L-98A-3E-GR	14.3			

Para unificar las unidades monetarias de los beneficios identificados y de los costos necesarios para la instalación, se consideró el cálculo del valor presente. Para calcular el valor presente se usó la expresión:

$$P = F \left[\frac{1}{(1 + i_g)^n} \right] \quad (1)$$

donde es el valor presente P de una cantidad futura dada F , después de n años a una tasa de interés global (Blank y Tarquin 2018). La tasa de interés global i_g se calcula a partir de una tasa de referencia de la economía mexicana, los certificados de la Tesorería de la Federación (CETES) a 28 días i , y considerando el efecto de la inflación proyectada f a partir de la ecuación:

$$i_g = i + f + if \quad (2)$$

La sumatoria de los valores presentes de la inversión y de cada uno de los costos de operación, mantenimiento y desmantelamiento del proyecto constituyen el Valor Presente Neto (VPN), uno de los métodos más empleados para analizar la conveniencia de invertir en un proyecto o para comparar diversas alternativas de inversión. Para analizar el efecto de la disponibilidad de materiales e insumos se establecieron dos escenarios; un escenario más probable, que corresponde a los valores medios de los costos unitarios en el mercado, y el peor escenario, en el que se adquieren materiales e insumos a los costos unitarios más altos disponibles en el mercado. Además, para considerar el efecto de la economía mexicana y especialmente como resultado de la contingencia sanitaria de la COVID-19, se examinaron tres etapas temporales de estudio: Pre-COVID, en marzo de 2020 ($i = 6.6 \%$; $f = 3.3 \%$), COVID, en febrero de 2021 ($i = 4.2 \%$, $f = 3.8 \%$), y Post-COVID, en septiembre de 2022 ($i = 10.3 \%$, $f = 8.7 \%$). Los valores de las tasas CETES y de la inflación en estas etapas temporales bajo estudio se obtuvieron en Banxico (2022a).

Análisis beneficio-costo. Para realizar el análisis beneficio-costo se seleccionó el tipo de vivienda 2L-98A-3E-GR, la cual cuenta con dos niveles, un área de techado de 98 m²,

tres equipos de acondicionamiento de aire en el segundo nivel y un techo verde instalado en su azotea. Este tipo de vivienda fue seleccionada porque posee el área de techado mayor, un techo verde extensivo y el mayor ahorro anual de energía eléctrica. La estimación de la relación beneficio-costos (B/C) del techo verde se realizó bajo los criterios descritos por Nordman *et al.* (2018). Una vez conocidos los beneficios positivos, beneficios negativos y costos del proyecto se empleó la relación planteada en Blank y Tarquin (2018):

$$\frac{B}{C} = \frac{B - BN}{C} \quad (3)$$

El proyecto es rentable si la relación B/C es mayor que 1. Los beneficios positivos (B) son las ventajas que experimenta el propietario. De acuerdo con el análisis de ciclo de vida, los beneficios ambientales de instalación del techo verde implican una disminución de impactos potenciales, tales como el uso de combustibles fósiles, el ahorro de energía eléctrica, la eutrofización y la captura de carbono. Sin embargo, no todos estos beneficios ambientales se traducen en un beneficio económico. Mientras que el ahorro energético se materializa en una disminución de la factura de consumo de energía eléctrica de una vivienda, la disminución de las emisiones de carbono y la capacidad del techo verde para capturar CO_2 del ambiente urbano depende de incentivos fiscales o descuentos especiales locales. Por su parte, otro beneficio económico asociado a la instalación de un techo verde es un descuento en impuestos de desarrollo urbano, como es el caso del impuesto predial.

En esta investigación se consideran como beneficios económicos el ahorro energético, la captura de carbono y el descuento en el impuesto predial anual. En el caso del ahorro energético, el consumo fue transformado a valores monetarios de acuerdo con las tarifas vigentes de la compañía proveedora del servicio en México, la Comisión Federal de Electricidad. Con respecto a la captura de carbono, en México no existe una regulación de precios sobre bonos para edificios residenciales; a diferencia de otros países en los que el bono por captura de carbono podría alcanzar los EUR 60 Ton^{-1} para el 2030, tal

como reporta The Organization for Economic Co-operation and Development (OECD 2021). Un bono de carbono es una forma de moneda o certificado para recompensar la mitigación de la contaminación y una forma de sancionar a los que más contaminan. Cada bono permite a su propietario emitir una cantidad de CO₂ y puede negociarse entre gobiernos, empresas y particulares (Agrawal y Tiwari 2015). Por ejemplo, en Ontario, Canadá, se otorga un subsidio al propietario de la vivienda de USD 10 Ton⁻¹ de carbono recuperado (Auld y Wright 2018). Sin embargo, en México existen estímulos incipientes sobre los bonos de carbono, tal es el caso de la implementación de un programa piloto del sistema de comercio de emisiones para empresas del sector energético e industrial (DOF 2019). Por ello, y con el propósito de analizar el efecto de este beneficio, en este estudio se considera un intervalo conservador de MXN 10 Ton⁻¹ a MXN 30 Ton⁻¹ de carbono no emitido. Por su parte, diversas regiones del país consideran un descuento en el impuesto predial anual como incentivo a la instalación de techos verdes. En Ciudad de México se otorga un descuento del 10% (GOCDMX 2022), un 10% en Nuevo León (H. Congreso del Estado de Nuevo León 2021), un 15% en la ciudad de Mérida (Ayuntamiento de Mérida 2021 – 2024) y un 20% en Jalisco (H. Congreso del Estado de Jalisco 2020). En este estudio se consideró un descuento de 10% en el impuesto predial anual de la vivienda, aunque este beneficio es marginal en comparación al ahorro energético y la captura de carbono.

Con respecto a los beneficios negativos (*BN*), estos se refieren a las desventajas para el propietario cuando se implementa el proyecto (Blank y Tarquin 2018). El beneficio negativo identificable es el costo de mantenimiento durante los 40 años de vida útil del proyecto, tomando en cuenta la periodicidad y los costos unitarios de acciones de mantenimiento, incluyendo el reemplazo de la membrana impermeable cada 10 años, y las acciones de jardinería, tales como riego, poda, deshierbe y fertilización.

Resultados

Análisis de costos unitarios. En la Tabla 3 se encuentra una lista de costos unitarios que fueron recopilados con cinco proveedores especializados en los materiales

necesarios para la construcción del techo verde tipo extensivo, tales como: primario asfáltico, membrana impermeable, barrera de raíces y drenaje.

Tabla 3. Costos unitarios de materiales de construcción de las capas de techo verde extensivo en la vivienda tipo 2L-98A-3E-GR.

Nombre comercial	Presentación	Cantidad requerida	Costo unitario (MXN)*
Primario asfáltico			
Emulsika Primer ¹	Cubeta 19 L	1	813
Impercoat ® Primario S ²	Cubeta 19 L	2	1 389
Delta MS ³	Rollo 49 m ²	2	3 871
Primercreto S ⁴	Cubeta 19 L	1	734
Hidroprimer ⁵	Cubeta 4 L	4	442
Membrana impermeable			
Sika Manto ¹	Rollo 10 m ²	8	2 292
Urelastic ® Jardín 925 Tar ²	Cubeta 19 L	4	8 142
Delta Drain ³	Rollo 49 m ²	2	6 615
Technoply SBS 3 mm ⁴	Rollo 10 m ²	8	873
Fester Drenante ⁵	Rollo 49 m ²	2	7 594
Barrera de raíces			
Uniplas ® Jardín Plus 200 ²	Rollo 150 m ²	4	8 720
Polietileno Antirraíz ³	Rollo 90 m ²	1	3 150
Technoply Garden 4 mm ⁴	Rollo 10 m ²	8	1 399
Fester Mip Garden ⁵	Rollo 10 m ²	8	2 369
Membrana de drenaje			
Sika Dren ¹	Rollo 40 m ²	1	3 722
Uniplas Drenaje geotextil ²	Rollo 42 m ²	2	8 822
Delta Drain ³	Rollo 49 m ²	2	6 615
Geocreto Dren CR ⁴	Rollo 42 m ²	2	4 537
Fester Drenante ⁵	Rollo 49 m ²	2	11 119

*Precios actualizados a octubre de 2022. Proveedores ¹Sika ®, ²Imperquimia ®, ³Delta ®, ⁴Curacreto ®, ⁵Fester ®.

El análisis estadístico reportó que los datos no se comportan normalmente por lo que fueron descritos en términos de cuartiles. Al respecto, debido a que la disponibilidad de materiales e insumos es variable en función de la dinámica oferta-demanda, el peor escenario corresponde a los costos unitarios más altos disponibles en el mercado y para ello se emplearon los valores máximos de cada material de la Tabla 1, mientras que el

escenario más probable corresponde a los valores medianos. Finalmente, los costos asociados al sustrato (profundidad de 12 cm de una mezcla de agrolita, fibra de coco y composta) y la cobertura vegetal de especies nativas del género *Tradescantia* se mantienen prácticamente fijos, pues son adquiridos localmente.

La mitigación de impactos y el análisis de ciclo de vida. Con respecto a los impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida, en la Tabla 4 puede observarse que existe una disminución de las emisiones de carbono en las viviendas que poseen techo verde en comparación a las viviendas con techo convencional.

En particular, existe una disminución de 3.6 % de emisiones para la vivienda 1L-47A-1E-GR, de 47 m², un solo nivel, con techo verde y consumo de energía de 5.2 MWh (220.9 Ton CO₂ eq anuales) en comparación con la misma vivienda 1L-47A-1E-CR, con techo convencional (228.8 Ton CO₂ eq anuales). La disminución máxima de emisiones de carbono fue de 12%, para la vivienda de 98 m² y con tres equipos de acondicionamiento de aire. En este tipo de vivienda, la instalación del techo verde permite reducir el consumo eléctrico anual de 17 MWh con techo convencional (2L-98A-3E-CR) a 14.3 MWh, con techo verde (2L-98A-3E-CR). Además, la instalación del techo verde en este tipo de vivienda representa una disminución de 72 Ton CO₂ eq anuales.

Tabla 4. Impactos ambientales potenciales de acuerdo con el análisis de ciclo de vida empleando IE4B.

Código del Tipo de vivienda	Consumo eléctrico anual (MWh)	Impactos ambientales potenciales				
		Calentamiento global (Ton CO ₂ eq)	Acidificación (kg SO ₂ eq)	Materia particulada (kg PM _{2.5} eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O ₃ eq)
1L-47A-1E-CR	5.5	228.8	568.1	337.4	119.8	8 024
1L-47A-2E-CR	7.0	269.0	650.9	414.6	143.5	8 841
1L-47A-3E-CR	10.0	349.5	816.6	569.1	190.8	10 476
2L-47A-1E-CR	5.5	244.8	645.5	358.9	130.0	9 462
2L-47A-2E-CR	7.0	284.9	728.3	436.2	38.3	10 279
2L-47A-3E-CR	10.0	365.4	894.0	590.6	201.0	11 913
1L-47A-1E-GR	5.2	220.9	554.0	322.1	115.1	7 884
1L-47A-2E-GR	6.4	253.1	620.3	383.9	134.1	8 538
1L-47A-3E-GR	8.6	312.4	741.7	497.2	168.7	9 736
2L-47A-1E-GR	5.2	236.9	631.5	343.7	125.4	9 322
2L-47A-2E-GR	6.4	269.0	697.7	405.4	144.3	9 975
2L-47A-3E-GR	8.6	328.0	819.2	518.7	179.0	11 174
1L-98A-1E-CR	9.0	352.9	895.2	553.4	199.7	12 598
1L-98A-2E-CR	12.0	433.4	1 060.9	707.8	247.0	14 233
1L-98A-3E-CR	17.0	567.4	1 336.9	965.3	325.8	16 956
2L-98A-1E-CR	9.0	379.6	1 021.1	588.3	218.0	14 996
2L-98A-2E-CR	12.0	460.0	1 186.7	742.8	265.3	16 631
2L-98A-3E-CR	17.0	594.1	1 462.8	1 000.2	344.1	19 354
1L-98A-1E-GR	8.3	334.3	860.9	517.6	188.7	12 255
1L-98A-2E-GR	10.8	401.4	998.9	646.3	228.2	13 617
1L-98A-3E-GR	14.3	495.3	1 192.1	826.5	283.3	15 524
2L-98A-1E-GR	8.3	361.1	986.7	552.5	207.0	14 653
2L-98A-2E-GR	10.8	428.1	1 124.8	681.3	246.4	16 015
2L-98A-3E-GR	14.3	521.9	1 318.0	861.5	301.6	17 922

El análisis beneficio-costo. Como se ha establecido anteriormente, en la relación B/C de la instalación de techos verdes en viviendas en climas tropicales, se ha considerado el tipo de vivienda 2L-98A-3E-GR a partir del cual se realizó un análisis de sensibilidad paramétrica considerando el costo unitario del servicio de mantenimiento del techo verde (honorarios por contratación de personal de jardinería), el número de mantenimientos al año, el precio del bono de carbono, los dos escenarios (más probable y el peor) con base en disponibilidad de materiales por la dinámica oferta-demanda, y las tres etapas

temporales de estudio, de acuerdo con las condiciones previas, durante y posteriores a la contingencia sanitaria de la COVID-19.

En la Figura 1 se analiza el efecto sobre la relación B/C del costo unitario de una acción de mantenimiento considerando diferentes acciones al año y diferentes bonos de carbono que un propietario recibiría al instalar un techo verde, si esta política se instaurara en México como ya ocurre en otros países. En Figura 1a se presenta el análisis para el escenario más probable; esto es, un escenario en el cual los materiales de instalación están disponibles localmente y sus costos unitarios son el valor mediano de los costos recopilados. Así mismo, se considera como parte del escenario más probable a un entorno económico con $i = 6.6\%$ y $f = 3.3\%$, que corresponde a la etapa pre-COVID.

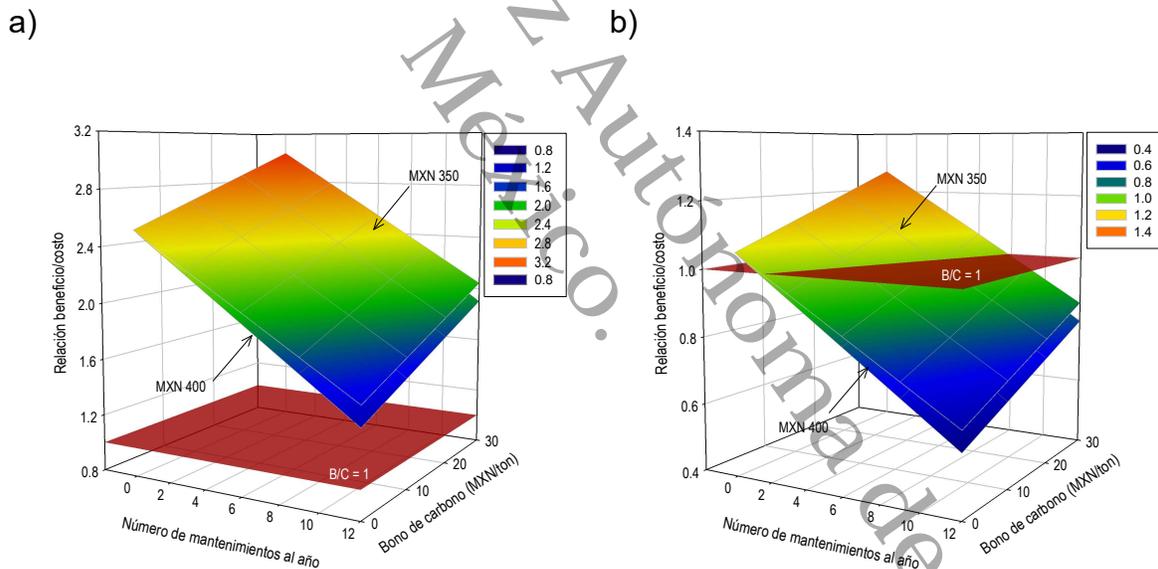


Figura 1. Efecto de la cuota de mantenimiento sobre la relación beneficio-costo para el escenario más probable y el peor escenario.

Puede notarse que, para ambos costos unitarios del servicio de mantenimiento (MXN 350 y MXN 400), y para cualquier número de acciones de mantenimiento y todo precio del bono de carbono, la relación B/C es superior a 1. Mientras mayores acciones de mantenimiento al año y menor incentivo por reducción de emisiones de carbono, la

relación B/C resulta más baja. En la mejor situación, considerando un bono de MXN 30 Ton⁻¹ de carbono no emitido y si el propietario realiza las acciones de mantenimiento (no se requiere contratar personal de jardinería), la relación B/C = 3.04 lo que resulta en una inversión claramente rentable con un periodo de recuperación de 3.6 años. En contraparte, en la situación extrema de que el propietario contrate 12 veces al año (una vez al mes) a personal de jardinería para mantenimiento del techo verde a un costo de MXN 400 por jornada, la relación B/C = 1.90 lo cual sigue siendo favorable para la inversión, aunque con un periodo de recuperación más lento (5.9 años). Por su parte, en la Figura 1b se muestra el efecto de los parámetros sobre la relación B/C para el peor escenario (poca disponibilidad de materiales con costos unitarios muy elevados). En ese escenario, obsérvese que el proyecto no es rentable, B/C < 1, si se consideran más de 6 acciones de mantenimiento al año sin importar el precio por bono de carbono y el costo unitario por el servicio de mantenimiento. Por el contrario, el proyecto es rentable con menos de 6 acciones de mantenimiento y, mientras mayor sea el precio del bono de carbono, más rápido se recuperará la inversión. En este peor escenario, considerando un bono de carbono de MXN 30 Ton⁻¹ y si el propietario realiza por sí mismo el mantenimiento del techo verde, la relación B/C = 1.77 con un periodo de recuperación de 6.3 años.

Para estudiar el efecto de diversos entornos de la economía mexicana, especialmente como resultado de la contingencia sanitaria de la COVID, en la Figura 2 se presenta el efecto de la inflación y la tasa de interés CETES a 28 días en tres etapas temporales de estudio: Pre-COVID, COVID y Post-COVID. Con respecto al escenario más probable de disponibilidad de materiales para la construcción (Figura 2a), debe observarse que, para cualquier situación de precio del bono de carbono, número y costo del servicio de mantenimiento, la relación B/C es mayor que 1. Sin embargo, en la situación de que no se incentive la captura o no emisión de carbono y el propietario decida solicitar el servicio de mantenimiento una vez al mes a un costo de servicio de MXN 350, la relación B/C = 1.08 y el periodo de recuperación de 7.3 años con un entorno económico poco atractivo donde prevalece la presión inflacionaria y una alta tasa de interés (etapa Post-COVID), que escasamente permite que el proyecto sea rentable. Por el contrario, si se incentiva

con un bono de MXN 30 Ton⁻¹ de carbono y el propietario realiza el mantenimiento de su techo verde, B/C alcanza un valor de 3.80, esto dentro de un entorno con inflación y tasa de interés muy bajas (etapa COVID) lo que asegura una alta rentabilidad y un periodo de recuperación de la inversión más corto (3.4 años). Sin embargo, este entorno económico de inflación y tasa de interés bajas fue atípico y ocurrió durante la contingencia sanitaria en la cual las entidades financieras, bancos centrales y gobiernos trataron de incentivar el consumo ante la caída abrupta de la economía. En contraparte, al analizar el peor escenario de disponibilidad de materiales para la construcción (Figura 2b), el proyecto de inversión en instalación de un techo verde extensivo en la vivienda bajo estudio es rentable si el entorno económico es similar a las condiciones de las etapas pre-COVID y COVID, pero con las condiciones económicas actuales, el proyecto solo es rentable si el propietario realiza el mantenimiento del techo verde o contrata menos de tres veces al año a personal de jardinería. Bajo las condiciones actuales, la relación B/C = 1.27 con una recuperación a 6.4 años considerando un bono de MXN 30 Ton⁻¹ y que el mantenimiento sea realizado por el propietario.

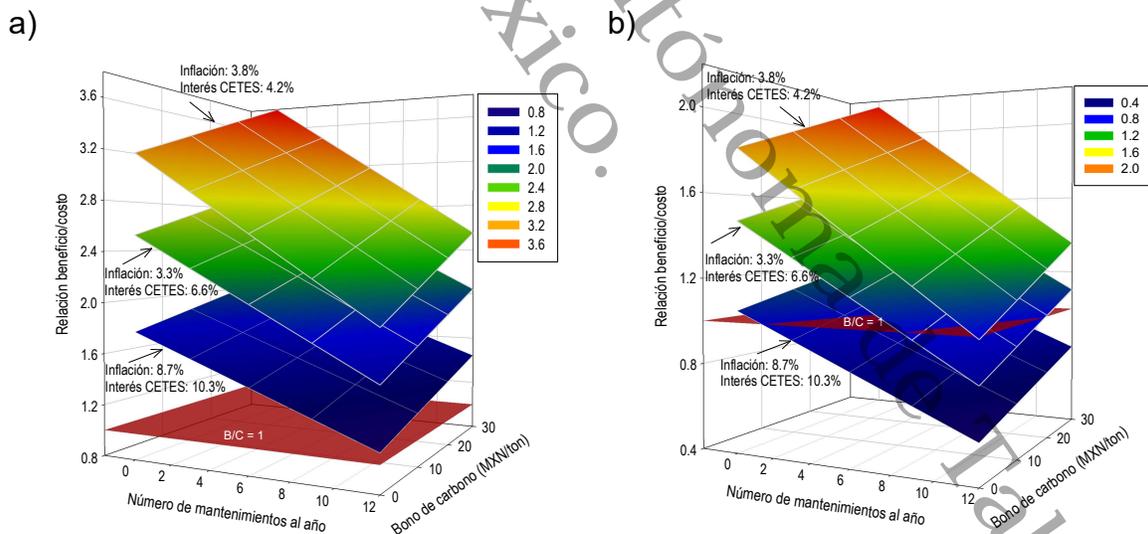


Figura 2. Efecto de la inflación y de la tasa de interés sobre la relación beneficio-costo para a) el escenario más probable, y b) el peor escenario.

En la Tabla 5 se resume el análisis beneficio-costo y el periodo de recuperación de la inversión en términos de los entornos económicos, escenarios de disponibilidad de

materiales, costos de instalación, acciones de mantenimiento y el precio del bono de carbono.

Tabla 5. Resumen del análisis beneficio-costado de la instalación de techos verdes extensivos en climas tropicales.

Entorno económico	Escenario	Costo de instalación (MXN)	Acción de Mantenimiento		Bono de carbono (MXN Ton ⁻¹)	Relación B/C	Periodo de recuperación (años)
			Costo unitario (MXN)	Número al año			
Pre-COVID	Más probable	40 219	-	0	30	3.04	3.6
			-	0	0	3.16	4.3
			400	12	30	1.90	5.9
	Peor escenario	68 869	-	0	30	1.77	6.3
COVID	Más probable	40 219	-	0	30	3.80	3.4
	Peor escenario	68 869	-	0	30	2.17	8.9
Post-COVID	Más probable	40 219	-	0	0	1.78	4.5
			350	12	0	1.08	7.3
	Peor escenario	68 869	-	0	30	1.27	6.4

De acuerdo con los resultados puede establecerse que la instalación de un techo verde extensivo en una vivienda bajo clima tropical, cuyo consumo de energía eléctrica es elevado debido al uso de equipos de acondicionamiento de aire, es rentable bajo un conjunto de condiciones económicas (dinámica oferta-demanda, diversos entornos de tasa de interés y de inflación), considerando algunos beneficios ambientales monetizables (ahorro energético y reducción de emisiones de carbono) e incluyendo un descuento en impuestos (impuesto predial). En términos generales, la relación B/C varía de 1.08 a 3.8 en función de dos alternativas: que el propietario realice las acciones de mantenimiento por sí mismo; o bien, la existencia de un mercado de bonos de carbono que recompense al propietario por el uso de un techo verde en su vivienda. Mientras que la primera alternativa es una decisión del propietario y el beneficio ambiental de ahorro energético es un beneficio económico real, el proyecto de instalación de un techo verde

extensivo resultaría rentable aún sin la existencia de un bono de carbono, aunque con periodos de recuperación de inversión más largos, de 6 a 7 años. Por su parte, la segunda alternativa es una decisión de política pública para mitigar el cambio climático e incrementar la adaptación y resiliencia de las ciudades, tal y como lo establecen los objetivos del desarrollo sostenible de la Agenda 2030.

Discusión

Considerando los valores medianos y máximos de los costos de materiales indicados en la Tabla 3, los costos de instalación de un techo verde extensivo con área de 98 m² es de MXN 57 719 y de MXN 86 369 para el escenario más probable y el peor escenario, respectivamente. Lo anterior implica que el costo de instalación varía entre USD 33 m⁻² y USD 50 m⁻² los cuales son menores en comparación a lo reportado en otros países (Hong *et al.* 2012; Manso *et al.* 2021b) pero similares a los reportados en México, variando entre USD 50 m⁻² y USD 75 m⁻² (López-González *et al.* 2020). Con base en el análisis de ciclo de vida de los impactos ambientales potenciales, se demuestra que el uso de un techo verde extensivo en edificios urbanos disminuye los impactos negativos al ambiente. En general, las simulaciones obtenidas con el programa IE4B dieron como resultado una disminución en todas las categorías de impacto: potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, emisiones de materia particulada, potencial de eutrofización y potencial de smog. Con respecto a estos impactos ambientales, en México y prácticamente todo el mundo (Shafique *et al.* 2020) no existen políticas específicas que incentiven la instalación de techos verdes con base en su capacidad para reducir emisiones atmosféricas y disminuir el efecto de la escorrentía en el potencial de eutrofización, a diferencia de las políticas ya establecidas como descuentos en impuestos debido al ahorro energético y acciones contra el cambio climático.

En este estudio se ha estimado una relación B/C entre 1.08 y 3.80 dependiendo de diversos factores (Tabla 5). En particular, cuando se considera el precio del bono de carbono como un beneficio del techo verde, la relación B/C incrementa significativamente. Esto concuerda con lo reportado por Auld y Wright (2018) quienes obtuvieron un VPN negativo; sin embargo, cuando se introduce el beneficio de un bono

por carbono recuperado o no emitido, el VPN fue positivo. Al respecto, Shin y Kim (2019) estimaron una relación $B/C = 1.17$ para un proyecto de techo verde extensivo en Seúl (Corea del Sur) considerando múltiples beneficios ambientales. Sin embargo, el clima predominante en Seúl es continental templado (Dwa, clasificación de Köppen) por lo que el uso de energía para enfriamiento o calentamiento de espacios habitables ocurre en algunos meses del año, a diferencia de este estudio, en donde las condiciones de clima tropical húmedo imperan casi todo el año. En un estudio realizado en Helsinki, Finlandia, Nurmi *et al.* (2016) indicaron que el proyecto de instalación de un techo verde extensivo no es rentable considerando únicamente los beneficios al propietario a menos que se considere el beneficio de aislamiento acústico que brinda el techo verde, para lo cual $B/C = 1.2$. Esta relación tan baja se debe a que los costos de instalación en Finlandia suelen ser considerablemente mayores que en países líderes en techos verdes, como Suiza o Alemania. Sin embargo, si se consideran los beneficios paisajísticos y el aislamiento acústico, la relación B/C varía de 2.5 a 3.5, demostrando la importancia de desarrollar instrumentos de política pública para convertir los beneficios públicos en beneficios económicos para el propietario. Recientemente, Manso *et al.* (2021a) realizó una encuesta para identificar el acceso a áreas verdes en ciudadanos de 35 países durante y después de la contingencia sanitaria por la COVID-19. El 68% de los encuestados habrían deseado tener acceso a un área verde propia dado que los parques públicos fueron cerrados. Al respecto, esta investigación establece que, incluso bajo un entorno económico desfavorable como la etapa Post-COVID, con tasa de interés e inflación altas, el proyecto de inversión en un techo verde extensivo es rentable. De hecho, especialistas del sector privado pronostican un descenso paulatino de la inflación a niveles de 5.1 % y 4.0 % para los años 2023 y 2024, respectivamente (Banxico 2022b). Sin embargo, las tasas de interés requerirán más tiempo para retornar a las condiciones Pre-COVID. Por ejemplo, se pronostica que la tasa CETES alcance un valor de 9.1 % en 2023, muy lejos aún de 6.6 %, registrado en marzo de 2020 (CEFP 2022). Lo anterior demuestra la importancia de reconocer una oportunidad de inversión, no solo en términos de beneficios económicos al propietario y de beneficios ambientales, sino también en función del entorno económico nacional.

Conclusiones

El análisis beneficio-costo del proyecto de instalación de un techo verde extensivo sobre una vivienda en climas tropicales ha demostrado una rentabilidad aceptable con relaciones B/C entre 1.1 y 3.8 con periodos de recuperación de la inversión de 3.4 a 8.9 años, en función de la disponibilidad de materiales, los indicadores económicos, el mantenimiento y la recompensa potencial con bonos de carbono al propietario. Aunque la rentabilidad no está supeditada a la existencia del bono de carbono, el beneficio incrementa significativamente a pesar de entornos económicos desfavorables. Por su parte, los costos de instalación en México suelen ser bajos debido a dos factores: i) el libre comercio con los Estados Unidos favorece la competencia y la adquisición de materiales a precios bajos, y ii) los costos de mano de obra son mucho menores en comparación a países desarrollados. Como resultado, los costos de instalación de un techo verde extensivo en el sur de México varían de USD 33 m⁻² a USD 50 m⁻². El análisis de ciclo de vida permitió cuantificar la reducción de impactos potenciales cuando se instala un techo verde en comparación a un techo convencional. No obstante, de todos los impactos potenciales estimados, en este estudio solo se ha incluido la capacidad del techo verde para reducir emisiones de CO₂ equivalente, dado que la reducción de la acidificación, el material particulado, la eutrofización y el smog no han sido considerados aún en políticas públicas urbanas en México y existen escasas políticas de este tipo en otros países. Por ello, la conversión de estos beneficios públicos en privados incrementaría considerablemente la rentabilidad de los techos verdes que, combinados con otras tecnologías verdes, tales como la captación pluvial y los paneles fotovoltaicos, los convertiría en un sistema clave para la infraestructura urbana sostenible.

Agradecimientos

Adriana de la Cruz y Miguel Ángel Jesús desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar sus estudios de posgrado.

Referencias

- Agrawal S, Tiwari GN (2015) Performance analysis in terms of carbon credit earned on annualized uniform cost of glazed hybrid photovoltaic thermal air collector. *Solar Energy* 115: 329-340. DOI: [10.1016/j.solener.2015.02.030](https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.030)
- Auld D, Wright J (2018) Carbon sequestering and green roofs technology: A benefit cost analysis. *Environmental Management and Sustainable Development* 7(1): 85-92. DOI: [10.5296/emsd.v7i1.12396](https://doi.org/10.5296/emsd.v7i1.12396)
- Ayuntamiento de Mérida 2021-2024 (2022) Programa de estímulo a las acciones ante el cambio climático. www.merida.gob.mx. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.
- Banxico (2022a) Portal del mercado de valores. Banco de México. <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=tas>. Fecha de consulta 7 de septiembre de 2022.
- Banxico (2022b) Encuesta sobre las expectativas de los especialistas en economía del sector privado: octubre de 2022. Banco de México, <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa>. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.
- Blank, LT, Tarquin AJ (2018) *Engineering economy*. 8th Edition. McGraw-Hill Education. New York, USA. 656P
- CEFP (2022) Paquete económico 2023. Criterios Generales de Política Económica. Cámara de Diputados, LXV Legislatura. Centro de Estudios de Finanzas Públicas. <https://www.cefp.gob.mx/indicadores/gaceta/2022/iescefp0342022.pdf> Fecha de consulta 13 de diciembre de 2022.
- DOF (2019) Acuerdo con el que se establecen las bases preliminares del Programa de Prueba del Sistema de Comercio de Emisiones. Diario Oficial de la Federación. Gobierno de México, 1 de octubre.
- GOCDMX (2022) Código Fiscal de la Ciudad de México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Fecha de consulta 2 de enero de 2023.
- H. Congreso del Estado de Jalisco (2020) Ley de hacienda municipal del Estado de Jalisco. <http://congresoweb.congresoajal.gob.mx/>. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.

- H. Congreso del Estado de Nuevo León (2021) Ley de hacienda para los municipios del Estado de Nuevo León. www.hcnl.gob.mx/trabajo_legislativo/leyes/. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.
- Hong T, Kim J, Koo C (2012) LCC and LCCO₂ analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. *Energy and Buildings* 45: 229-239. DOI: [10.1016/j.enbuild.2011.11.006](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.006)
- IEA (2020) World Energy Outlook 2020, International Energy Agency, Paris. www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.
- ISO 14044 (2006) Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.
- Koroxenidis E, Theodosiou T (2021) Comparative environmental and economic evaluation of green roofs under Mediterranean climate conditions - Extensive green roofs a potentially preferable solution. *Journal of Cleaner Production* 311: 127563. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.127563](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127563)
- López-González BG, Camacho AD, Martínez-Rodríguez MC, Marcelin-Aranda M (2020) Techos verdes: Una estrategia sustentable. *Revista Tecnología en Marcha* 33: 68-79. DOI: [10.18845/tm.v33i3.4389](https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4389)
- Manso M, Sousa V, Matos Silva C, Oliveira Cruz C (2021a) The role of green roofs in post COVID-19 confinement: An analysis of willingness to pay. *Journal of Building Engineering* 44: 103388. DOI: [10.1016/j.jobbe.2021.103388](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103388)
- Manso M, Teotónio I, Matos Silva C, Oliveira Cruz C (2021b) Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135: 110111. DOI: [10.1016/j.rser.2020.110111](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111)
- Nordman EE, Isely E, Isely P, Denning R (2018) Benefit-cost analysis of stormwater green infrastructure practices for Grand Rapids, Michigan, USA. *Journal of Cleaner Production* 200: 501-510. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.07.152](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.152)
- Nurmi V, Votsis A, Perrels A, Lehvävirta S (2016) Green roof cost-benefit analysis: Special emphasis on scenic benefits. *Journal of Benefit-Cost Analysis* 7: 488–522. DOI: [10.1017/bca.2016.18](https://doi.org/10.1017/bca.2016.18)

- OECD (2021) Effective carbon rates 2021: Pricing carbon emissions through taxes and emissions trading. Organization for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2021-0e8e24f5-en.htm>. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.
- Rasul MG, Arutla LKR (2020) Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment. Energy Reports 6: 503-508. DOI: [10.1016/j.egy.2019.09.015](https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.015)
- SMN (2022) Normales climatológicas por Estado: Tabasco, Centro. Estación 27054, Villahermosa (DGE). Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/> Fecha de consulta 2 de septiembre de 2022.
- Shafique M, Azam A, Rafiq M, Ateeq M, Luo X (2020) An overview of life cycle assessment of green roofs. Journal of Cleaner Production 250: 119471. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.119471](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119471)
- Shin E, Kim H (2019) Benefit–cost analysis of green roof initiative projects: The Case of Jung-Gu, Seoul”. Sustainability 11: 3319. DOI: [10.3390/su11123319](https://doi.org/10.3390/su11123319)
- USEPA (2012) Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI) version 2.1. User’s guide. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, EPA/600/R-12/554, July.

CAPÍTULO 3

Mathematical Model for the Heat Balance of a Green Roof in Humid Tropics Conditions

Mathematical Model for the Heat Balance of a Green Roof in Humid Tropics Conditions

Adriana de la Cruz Uribe, José Ramón Laines Canepa, Erika Escalante Espinosa, José Roberto Hernández Barajas

Resumen:

From the perspective of the associated thermal processes, the green roof reduces heat transfer through the roof of a building, thus reducing the consumption of electrical energy for heating or cooling the building. The three heat transfer mechanisms, conduction, convection and radiation are affected by the vegetation layer of the green roof not only by the change in the thermal characteristics of the materials but also by the evapotranspiration and metabolic processes occurring in the micro-ecosystem. Therefore, it is convenient to analyze the thermal performance of the different components of a green roof in order to establish the individual effect of each of them on the overall heat transfer balance. This heat balance can be estimated from the use of a mathematical model of mechanistic type; that is, based on the laws of conservation of mass, energy and quantity of motion. Such a model allows mathematical relationships to be established between measurable variables in a green roof, such as ambient temperature, precipitation, humidity and solar radiation, and response variables, such as temperature and humidity profiles in the substrate and the thermal behavior of the roof support material, as well as in the interior of a building. This research develops a mathematical model that represents the physicochemical and biological phenomena directly related to the capacity of a green roof to reduce the penetration of the outside temperature into the interior of buildings in urban areas with humid tropical climate, with the main purpose of reducing the annual consumption of electricity, reducing the time of use of air conditioners. The model is adjusted numerically based on data collected from an experimental unit located in Villahermosa, Tabasco, where native plant species of southeastern Mexico were established. Three components of a green roof are considered in the derivation of the model: structural support, composed of the impermeable membrane, root barrier and drainage system, the growing substrate and vegetative cover. A robust mathematical model applicable to real conditions was obtained to analyze the

effect of operating variables and design criteria on the performance of the installation of a green roof to reduce heat gain inside urban buildings in regions with humid tropical climate.

Palabras clave: Model, green roof, humid tropics.

Institución de adscripción de cada autor:

División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,

Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, 86287, Villahermosa, Tabasco, México.

Mathematical Model for the Heat Balance of a Green Roof in Humid Tropics Conditions

Heat balance model for green roofs

*Adriana de la Cruz Uribe, José Ramón Laines Canepa, Erika Escalante Espinosa, José Roberto Hernández Barajas**

División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, CP. 86150, Villahermosa, Tabasco, México.

Abstract

From the perspective of the associated thermal processes, the green roof reduces heat transfer through the roof of a building, thus reducing the consumption of electrical energy for heating or cooling the building. The three heat transfer mechanisms, conduction, convection and radiation are affected by the vegetation layer of the green roof not only by the change in the thermal characteristics of the materials but also by the evapotranspiration and metabolic processes occurring in the micro-ecosystem. Therefore, it is convenient to analyze the thermal performance of the different components of a green roof in order to establish the individual effect of each of them on the overall heat transfer balance. This heat balance can be estimated from the use of a mathematical model of mechanistic type; that is, based on the laws of conservation of mass, energy and quantity of motion. Such a model allows mathematical relationships to be established between measurable variables in a green roof, such as ambient temperature, precipitation, humidity and solar radiation, and response variables, such as temperature and humidity profiles in the substrate and the thermal behavior of the roof support material, as well as in the interior of a building. This research develops a mathematical model that represents the physicochemical and biological phenomena directly related to the capacity of a green roof to reduce the penetration of the outside temperature into the interior of buildings in urban areas with humid tropical climate, with the main purpose of reducing the annual consumption of electricity, reducing the time of use of air conditioners. The model is adjusted numerically based on data collected from an experimental unit located in Villahermosa, Tabasco, where native plant species of southeastern Mexico were established. Three components of a green roof are considered

in the derivation of the model: structural support, composed of the impermeable membrane, root barrier and drainage system, the growing substrate and vegetative cover. A robust mathematical model applicable to real conditions was obtained to analyze the effect of operating variables and design criteria on the performance of the installation of a green roof to reduce heat gain inside urban buildings in regions with humid tropical climate.

Key words: Model, green roof, humid tropics.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Introduction

The effectiveness of a green roof can be evaluated through experimental testing and mathematical modeling. Mathematical models are advantageous as they allow for analysis in various scenarios by altering the parameters and design criteria of a green roof. One of the first models developed for green roofs was proposed by Palomo del Barrio [16], which establishes a dynamic model to study the thermal behavior of green roofs by analyzing the sensitivity of their parameters. Palomo del Barrio [16] concludes that green roofs serve as a means of insulating a building by reducing the amount of heat entering the building. The most sensitive parameters of the model are leaf area index (LAI), leaf area geometry, soil bulk density, soil depth, and moisture content.

In 2005, Lazzarin *et al.* [13] proposed a mathematical model that was integrated into a building energy simulation program. They compared the results obtained from their model with experimental measurements during summer. Kumar and Kaushik also presented a model that was based on equations applied to a control volume and discretized through finite differences. The authors considered an interaction between three green roof components: vegetation cover, substrate layer, and support layer. The model was validated with experimental data from a green roof located in India. The authors found deviations of less than 6% in the prediction of the temperature inside the building.

Alexandri and Jones [2] developed a one-dimensional dynamic model that described mass and heat transfer in green roofs. They validated the model using an experimental unit and analyzed the effect of convective heat transfer coefficient and stomata resistance in detail. In a later publication, the same authors proposed an advanced two-dimensional model, where they studied different geometries of the urban heat sink. They concluded that the wind speed around a building is essential to energy savings. Subsequently, Sailor [19] proposed a model for green roofs that allows for the analysis of the effect of soil thermal properties, soil depth, and vegetation characteristics such as plant type, average height, and LAI. The model has been included as a module of an energy simulator program and tested on green roofs in cities in the United States. The study concludes that the most significant parameters in the energy efficiency associated with a green roof are soil depth, irrigation, vegetation density, and climate type. Ouldboukhitine *et al.* [15]

evaluated the thermal performance of green roofs through a coupled heat and mass transfer model, in which the energy efficiency of buildings was established, providing a cooling effect in the summer and an exploitation of solar radiation because of the reflective properties found inside the foliage. The proposed model is based on the energy balance equations expressed by the foliage and soil. The authors considered mass transfer in thermal properties and evapotranspiration, added the water balance equation to the model, and performed a numerical simulation.

Tabares-Velasco and Srebric [22] proposed a model that considers the heat and mass transfer processes between the atmosphere, plants and substrate. The model was validated with experimental data consisting of surface temperature, conduction heat flux, convective heat flux, net radiation and evapotranspiration validation of the model shows that it accurately predicts heat and mass transfer but underestimates the maximum evapotranspiration rates. In the same year, Jaffal *et al.* [7] propose a green roof thermal performance model, with a building code to allow evaluation of green roof foliage temperatures and ground surface temperatures. The simulations were carried out for a single-family house with conventional and green roofs in a temperate French climate and found that the annual energy demand was reduced by 6%. They concluded that green roofs are thermally beneficial for temperate, hot and cold climates in Europe. Ghassem-Arash [6] performed a numerical simulation of the performance of a green roof through the solution of a green roof model with a complex coupled system of differential equations of heat and mass transfer that considers four elements: air, vegetation, substrate and roof structure, simultaneously, the equations were discretized with a finite difference method. They also compared a green roof with a concrete roof and found that the green roof allows a 77% reduction in heat flux. Agualeles *et. al* [1] developed a simple one-dimensional mathematical model to estimate the energy stored in a green roof in a typical day, made analytical solutions, to obtain guidelines regarding the design of green roofs, and compared with their numerical solutions, they concluded that choosing a substrate of low density, conductivity and heat capacity will reduce the energy storage capacity of the roof. In the Grand Duchy of Luxembourg, the residential sector is a major energy consumer as well as greenhouse gas emitter, so Poncin [18] conducted an evaluation on the

effectiveness of policies, through a LuxHEi model to reduce energy consumption and CO₂ emissions in residential areas of Luxembourg, concluded that building codes generate much of energy savings and mitigation of carbon dioxide emissions and that regulations affect the energy efficiency of buildings. The transient model of Polo-Labarrios *et. al* [17] for a conventional building and one with a green roof, unlike other models, considers the heat transfer through the walls, since it has an important impact on the temperature inside the building, finding in their research that green roofs decrease the temperature, reducing temperature fluctuations by up to 14 K, and in summer in hot regions such as Mexico City, a reduction of up to 12 K.

Materials and methods

Area and object of study

Villahermosa is the capital of the province of Tabasco, located in southeastern Mexico at coordinates 17° 59' 48" North, 92° 55' 42" West, where a warm, humid climate with abundant rainfall predominates (Köppen Am: tropical monsoon climate) with average maximum temperatures of 35.4 °C and 27.9 °C, for May and January, respectively, and average minimum temperatures of 24.5 °C and 19.5 °C, for the same months during the period 1981-2010 according to the National Meteorological Service (SMN, 2022). Annual rainfall during the same period was 1,972 mm, with September being the wettest month, with 324 mm. The study considered the hypothetical installation of an extensive green roof over a residential building in the urban area of Villahermosa, Tabasco. In this region, there are high rates of normal annual evaporation (1,642 mm), producing high relative humidity values in the environment, which causes a higher thermal sensation.

Mathematical model for heat balance. Implementing a mathematical model requires estimating physical and thermal properties and reliable experimental measurements. The model considered is mechanistic, dynamic, and one-dimensional concerning the vertical coordinate of the green roof. The model is based on the assumptions made in the work of Palomo del Barrio [16] and reviewed by Alexandri and Jones [2] and consists of a heat

balance in the three main components of a green roof: vegetation cover, growth substrate, and structural support (Figure 1). The relevant mechanisms represent mass and energy transfer, and the model can appropriately predict the main state variables as a function of the roof components.

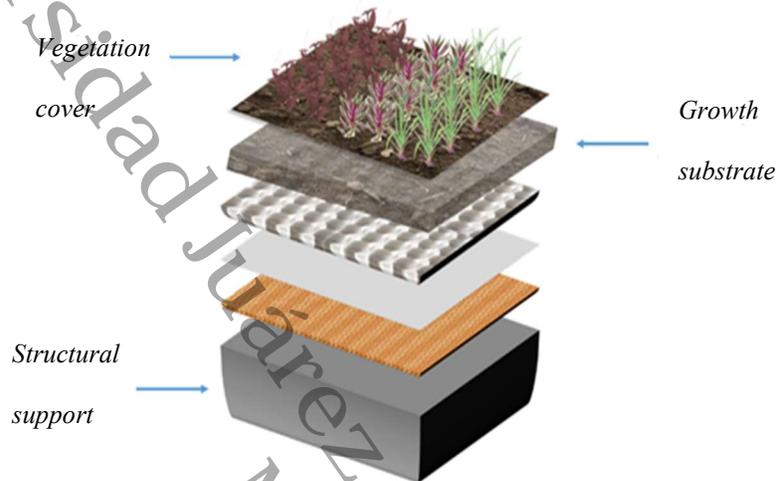


Figure 1. Main components of a green roof: vegetation cover, growth substrate and structural support.

Vegetation cover

There are mechanisms of mass and heat transfer in vegetation: solar radiation absorbed by the vegetation cover, exchange of short-wave radiation between the vegetation cover and the atmosphere, heat transfer by convection between the vegetation cover and the substrate with the surrounding air, evapotranspiration of the vegetation cover, evaporation-condensation of water vapor on the soil surface, and convective transport. For the vegetation layer, equation 1, we followed the model of Palomo del Barrio [16] adapted to plants native to the region: *T. spathacea* and *T. pallida*, which have been tested and are very well adapted to the humid tropical climate.

$$\left\{ \begin{aligned} (\rho c)_p dLAI \frac{dT_p}{dt} &= \varphi_{rad,sol} + \varphi_{rad,TIR} + \varphi_{conv,p-a} + \varphi_{trans,p-a} \\ (\rho c)_a L \frac{dT_a}{dt} &= \varphi_{conv,a-p} + \varphi_{con,a-g} + \varphi_{conv,a-\infty} \\ \rho_a L \frac{d\theta}{dt} &= \varphi_{vap,a-p} + \varphi_{vap,a-g} + \varphi_{vap,a-\infty} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

The considerations of Palomo del Barrio [16] and reviewed by Alexandri and Jones [2] were made for the heat and vapor fluxes, except for the sensible heat fluxes between the foliage and the air of the vegetation cover and the energy fluxes due to leaf transpiration, equation (2), where a contribution was made to the external and internal resistances, due to the changes that the temperatures of the region undergo throughout the day.

$$\varphi_{conv,a-p} = 2LAI \frac{(\rho c)_p}{r_e} (T_p - T_a) \quad (2)$$

The value of $(\rho c)_p$, specific heat capacity in leaves, is followed from Jayalakshmy and Philip [8]. The external resistance (r_e) is given by:

$$r_e = \frac{1174l^{0.5}}{(|T_p - T_a| + 207u^2)^{0.25}} \quad (3)$$

where l characteristic dimension of the leaf, u wind speed [$m s^{-1}$], T_p foliage temperature, T_a air temperature inside the vegetation. For the transfer between the foliage and the air temperature inside the vegetation, the relationship is:

$$\varphi_{trans,p-a} = -2LAI \frac{(\rho c)_p}{\gamma(r_e + r_i)} (e_p - e_a) \quad (4)$$

Sinusoidal functions were adapted to the model to estimate the term of internal resistance of plants to vapor transfer that is present in the flow of energy transpiration consumed to evaporate water from the leaves; this is taken by the concept of circadian rhythms defined as physical changes that follow a 24-hour cycle, such natural processes are governed mainly by light and darkness, day and night, affecting most living things, animals and plants. Biological rhythms allow plants to anticipate changing external conditions such as

light and temperature, thus improving plant resistance, efficiency, and growth Asgari and Klerman [3]. The internal resistance model of the leaves is:

$$r_i = r_{min} \tilde{r}_i(I_s) \tilde{r}_i(T_p) \tilde{r}_i(CO_2) \tilde{r}_i(e_p - e_a) \tag{5}$$

The symbols \tilde{r}_i are functions that depend respectively on solar radiation, temperature in vegetation, amount of CO₂ and evapotranspiration rates, as follows:

$$\tilde{r}_i(I_s) = \frac{\bar{I}_s + c_1}{\bar{I}_s + c_2} \tag{6}$$

$$\bar{I}_s = \frac{A_s \cdot I_s}{2 \cdot LAI} \tag{7}$$

$$\tilde{r}_i(T_p) = 1 + c_3(T_p - T_m)^2 \tag{8}$$

$$\tilde{r}_i(CO_2) = 1 + c_4(CO_2 - 200)^2 \tag{9}$$

$$\tilde{r}_i(e_0 - e_a) = 1 + c_5(e_0 - e_a)^2 \tag{10}$$

r_{min} , (s m⁻¹), is the minimum possible resistance of the plants, and each parameter, c_3 , c_4 , c_5 , T_m present in the submodels of r_i are approximations taken in the sinusoidal form:

$$c_i = 0.5(C_{i,n} - c_{i,d}) \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{12t} \right) + 0.5(c_{i,n} + c_{i,d}) \tag{11}$$

The values of c_1 and c_2 were taken constant and are shown in Table 1, Stanghellini [22].

Table 1. Parameter values of any of the functions \tilde{r}_i .

		Day	Night	Units
$\tilde{r}_i(I_s)$	r_{min}	82	658.5	[s m ⁻¹]
	c_1	4.3	NI	[W m ⁻²]
	c_2	0.54	NI	[W m ⁻²]
$\tilde{r}_i(T_p)$	T_m	24.5	33.6	[°C]

On the other hand, sky temperature, which quantifies the properties of the infrared emission of the different gases in the atmosphere, is defined as the temperature of a black body that emits the same amount of thermal energy as the sky. This temperature is calculated by:

$$T_{sky} = \varepsilon_{sky}^{0.25} T_{dp} \quad (12)$$

in which case the sky emissivity is calculated in two steps. First, the emissivity is estimated under clear-sky conditions. Then, a correction factor is added to it, which contains the cloudiness ranging from 0 to 8, considering that 0 is the factor for a clear day, according to considerations of Zhang *et al.* [24].

The dew point temperature (T_{dp}) was estimated with a very simple rule, used by Lawrence [12]

$$T_{dp} = T_{\infty} - \frac{(1 - hum)}{0.05} - 273.15 \quad (13)$$

T_{∞} is the temperature of the air surrounding the green roof, hum is the percentage of air relative humidity, and T_{dp} is the dew point temperature in K.

Growth substrate

The substrate is a porous medium with three phases: solid, liquid (free water), and gaseous (humid air). Due to the humid conditions of the region, heat transfer in the growth substrate is a function of the relative humidity of the soil, which in turn determines the thermal conductivity. Therefore, the substrate moisture potential (ψ_p), is considered as an additional equation. The additional soil moisture (ω_g), as a partial differential equation of mass transfer, must also be considered.

The growth substrate is modeled with three equations: heat transfer (temperature profile), mass transfer (moisture profile), and moisture potential, following a model proposed by Alexandri and Jones [2]. To model heat conduction and mass transfer in a moisture potential, a substrate-water-air mixture is made, and the substrate's volumetric water content is used to express the substrate's moisture. Changes in temperature is given by:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_g C_G} \left(K_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial K_s}{\partial z} \right) \quad (14)$$

$K_s = \max\{418 \exp(-\log|\psi_p| - 2.7), 0.172\}$, is the thermal conductivity of the substrate mixture, water, air, ($W m^{-1} K^{-1}$) which can be expressed as:

$$K_s = 8.5815(\psi_p)^{-0.28864}, K_s = a_k(\psi_p)^{b_k} \quad (15)$$

therefore, its derivative is:

$$\frac{\partial K_s}{\partial z} = a_k b_k (\psi_p)^{b_k - 1} \frac{\partial \psi_p}{\partial z} \quad (16)$$

where the permeability coefficient and the moisture potential of the substrate are defined as:

$$K_g = K_{g,s} \left(\frac{\omega_g}{\omega_{g,s}} \right)^{2b+3}, \psi_p = \psi_{p,s} \left(\frac{\omega_{g,s}}{\omega_g} \right)^b \quad (17)$$

Moisture potential, which is of interest for humid tropical climates, is defined as the soil's maximum moisture potential (cm) or water tension. It is the potential energy needed to extract water from the soil's capillary and adhesive forces of the soil Jacobson [9].

Structural support

The support consists of the construction material used for the roof base (concrete), as well as the various cladding layers, insulation, root protection and drainage system. Energy transfer is the most relevant transport phenomenon since it has been assumed that there is no infiltration of liquids or gases, only the effect of the moisture content of the roof base, a crucial effect in humid tropical climates. As a result, the structural support is represented by two partial differential equations (as a function of time t and vertical direction z): the first one for the temperature profile of the support and the second one for the profile of the moisture content in the external layer of the support. Typical structural support for the roof of an urban residential building is made of a mixture of cement and aggregates (sand, gravel, among others). Concrete is a mixture of aggregates, usually sand, and gravel or crushed stone, bound by a cement paste binder. The paste is composed of Portland cement and water. Thus, the structural support is a porous medium through which energy in the form of heat is transported by a diffusive mechanism (Fourier's Law), and water (liquid and vapor) is transported by a diffusive mechanism for the gaseous state (Fick's Law) and a capillary transport mechanism for the liquid state. Mass and energy transport mechanisms are dynamic since heat and moisture sources depend on weather and climate conditions, which change on a daily and seasonal basis. Considering these concerns, the structural support model was supposed as in Zhong [25].

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + h_{fg} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial P_v}{\partial z} \right) = \frac{\partial T_s}{\partial t} \rho_s (c_{p,d} + \gamma c_{p,w}) \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial P_v}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial P_l}{\partial z} \right) = \rho_s \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (19)$$

Solution method to solve the model

The Crank-Nicolson algorithm is used in the solution of linear PDEs because of its unconditional stability and high order of convergence. It is based on defining the time derivatives as finite progressive differences, while the spatial derivatives are expressed as central finite differences. Crank-Nicolson is a combination of explicit and implicit

methods. Kreyszig [10], Chapra and Canale [5] and Burden & Faires [4]. And since the Structural Support and Substrate models have partial derivatives, this method has been selected to discretize them.

On the other hand, since the vegetation layer is a system of ordinary differential equations, a Runge-Kutta numerical method was used, also considering its algebraic equations. To find the numerical solution of the substrate system, the temporal partial derivative was discretized as a first-order finite progressive difference, the second spatial partial derivative with a Crank-Nicolson scheme, and the spatial partial derivatives are approximated with first-order central finite differences. For the structural support, once the discretized system was obtained, an algebraic system of equations was obtained and solved with a Crout Factorization algorithm. All the applied methodology was programmed in Microsoft Excel Visual Basic for Applications (VBA).

Results and discussion

The green roof model was proposed in three scenarios according to three different dates of the year, these dates are representative of the rainy season, in the month of November, a date in January, which represents the cold front season and one more in the month of May, considered the dry season, in the city of Villahermosa, Tabasco, where a humid tropical climate prevails. In this model, considerations were made for native plant species with an angle of inclination in the leaves of *T. spathacea* of 73.4° in a sample of 237 plants, data that is useful to obtain the extinction coefficient (k_l) for longwave radiation from the vegetation layer since the longwave transmittance (τ_l) is affected by the geometrical properties of the plants, in the equation $\tau_l(LAI) = e^{-k_l LAI}$. With this data of 73.4° , a regression model obtained an extinction coefficient of 0.576 and a leaf area index in the range of 2 to 5. Figure 2.

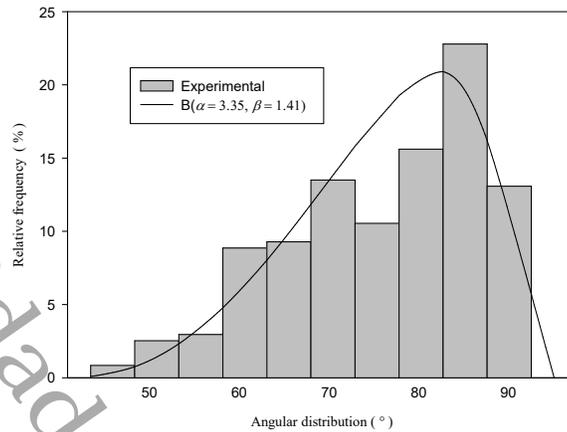
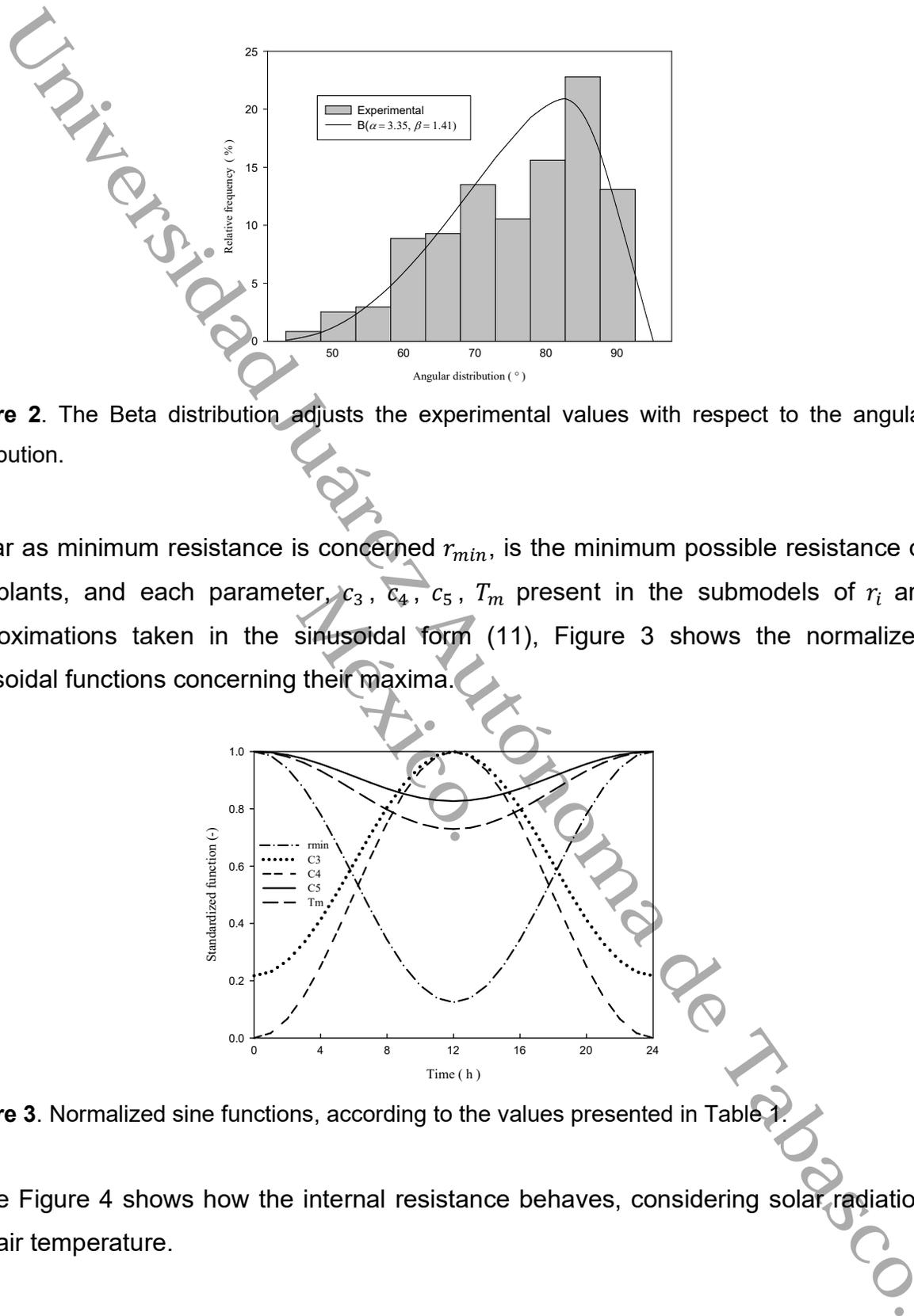


Figure 2. The Beta distribution adjusts the experimental values with respect to the angular distribution.

As far as minimum resistance is concerned r_{min} , is the minimum possible resistance of the plants, and each parameter, c_3 , c_4 , c_5 , T_m present in the submodels of r_i are approximations taken in the sinusoidal form (11), Figure 3 shows the normalized sinusoidal functions concerning their maxima.

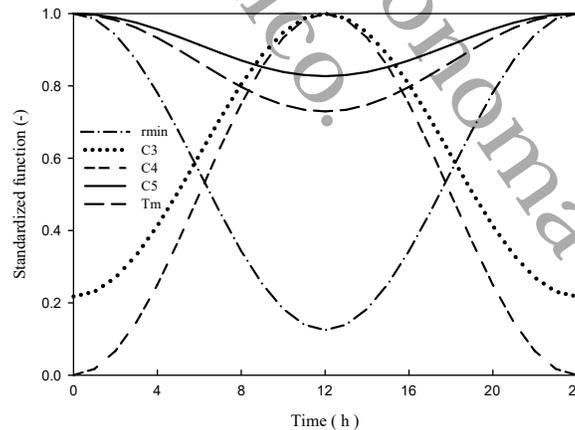


Figure 3. Normalized sine functions, according to the values presented in Table 1.

While Figure 4 shows how the internal resistance behaves, considering solar radiation and air temperature.

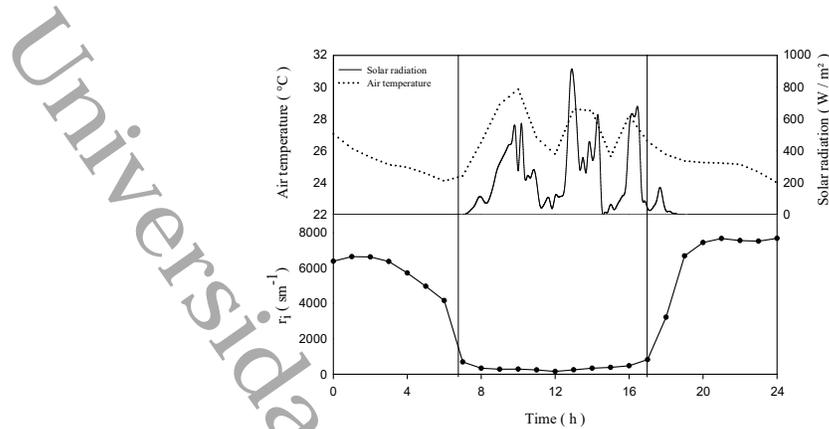


Figure 4. Internal resistance values, considering solar radiation and air temperature.

The data for the three scenarios studied are shown in Table 2, with variables of temperature, wind speed, solar radiation, rainfall and relative humidity.

Table 2. Scenarios depending on the time of the year.

Environmental parameter	Rainy season (November)	Cold front season (January)	Low water season (May)
Temperature (°C)			
Mean	25.6	20.3	31
Maximum	31.4	25.1	37.2
Minimum	22.3	16.6	26.6
Wind speed (km/h)			
Mean	3	5.2	6.4
Maximum	9.7	11.5	11.9
Minimum	0	0	0
Peak solar radiation (W/m ²)	1007	880	798
Rainfall (mm)	167.2	0	0
Relative humidity (%)	94.5	78.2	72.7

From the solution of the vegetation model in the three scenarios: cold front, rainy and low water levels, the results shown in Figure 5 were obtained.

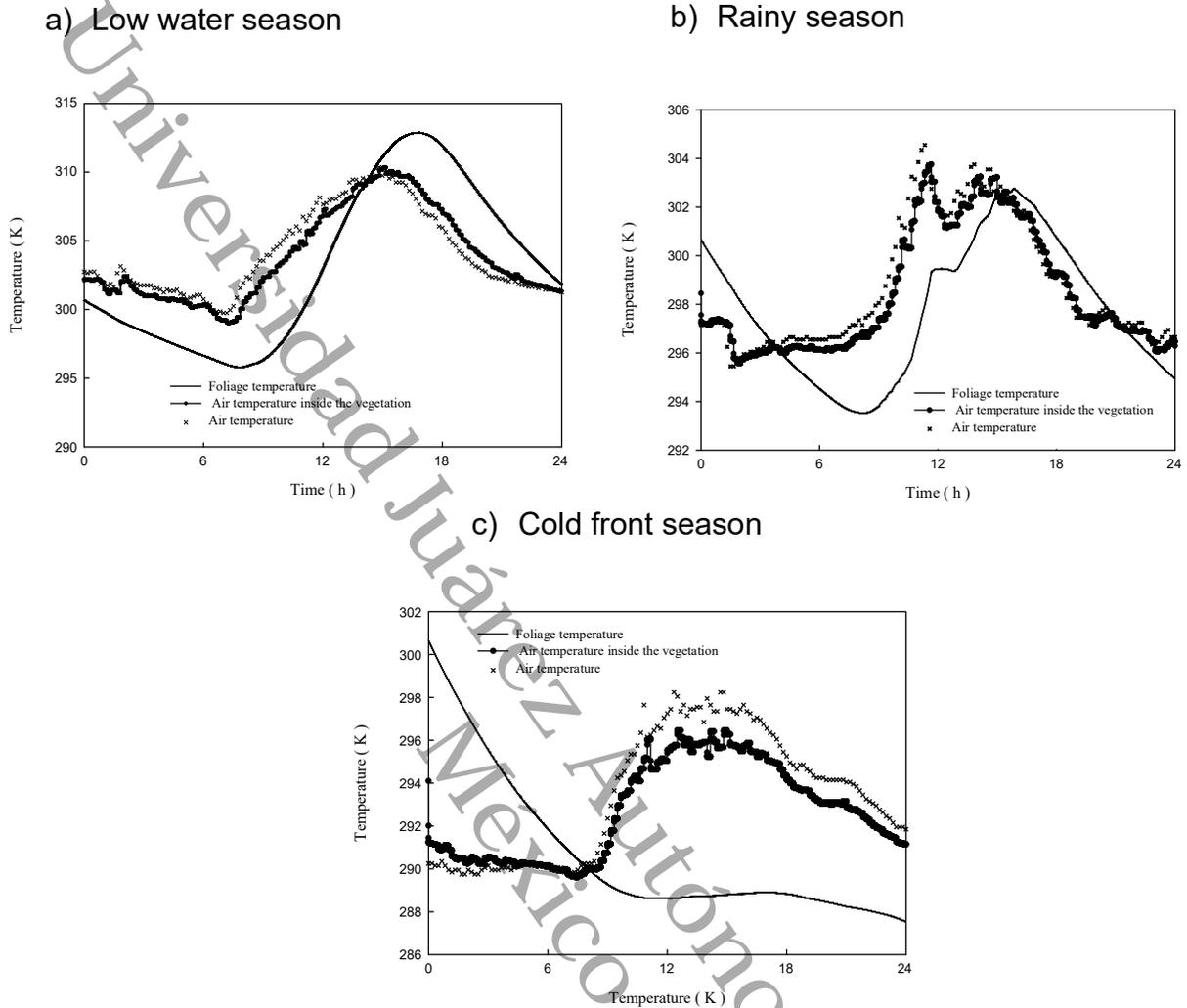


Figure 5. Temperature profile in the green roof vegetation layer during three seasons in Villahermosa, Tabasco.

A very important variable for the humid tropical climate in Villahermosa, Tabasco is humidity, since it is a factor for the temperature sensation to be higher than the temperature in the state. The values of how it behaves in the green roof during the three scenarios are shown in Figure 6. In the three scenarios considered, the humidity is always below the relative humidity normally found in the structural support of a conventional roof, due to the function performed by the vegetation layers and the substrate layer.

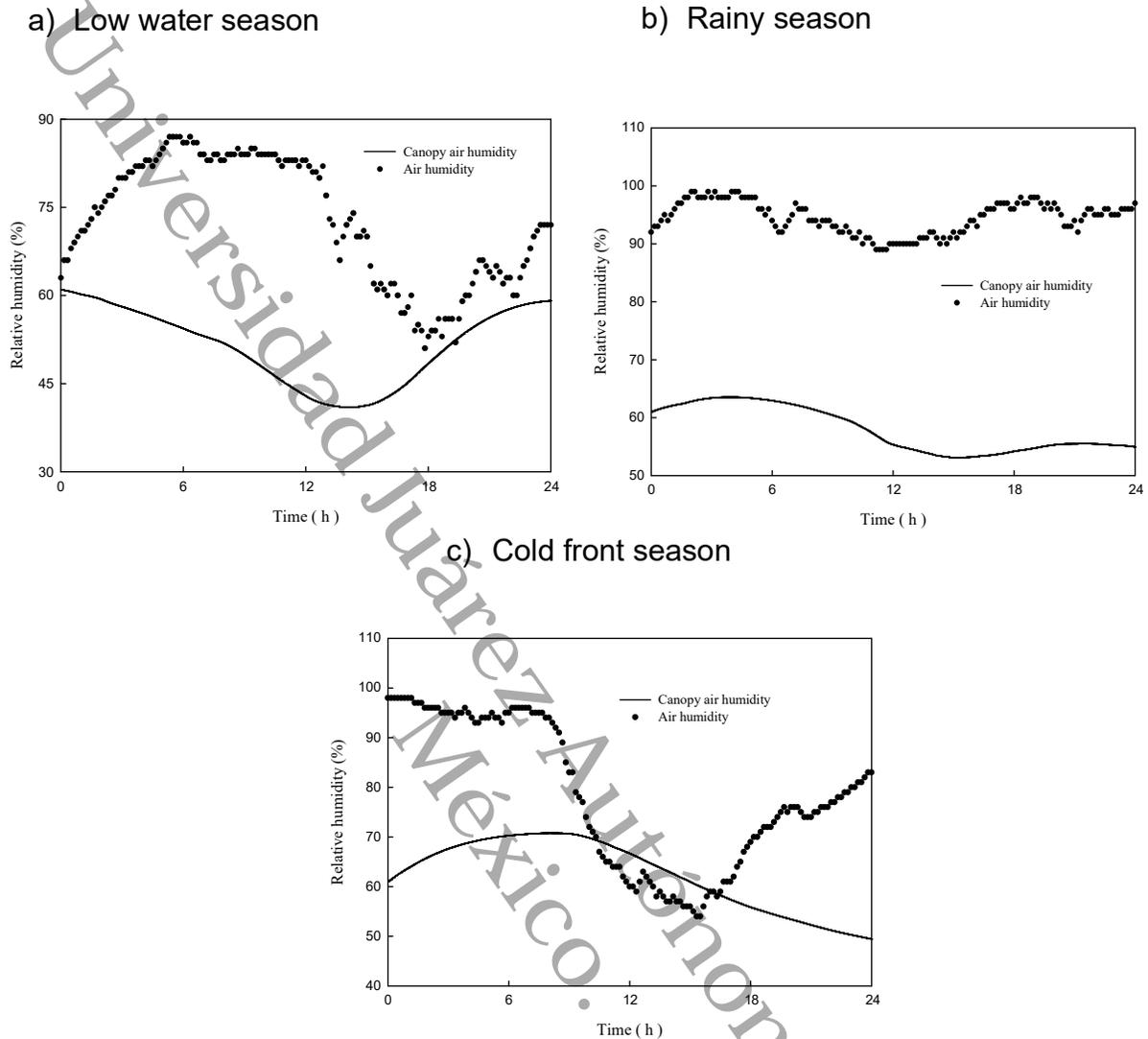
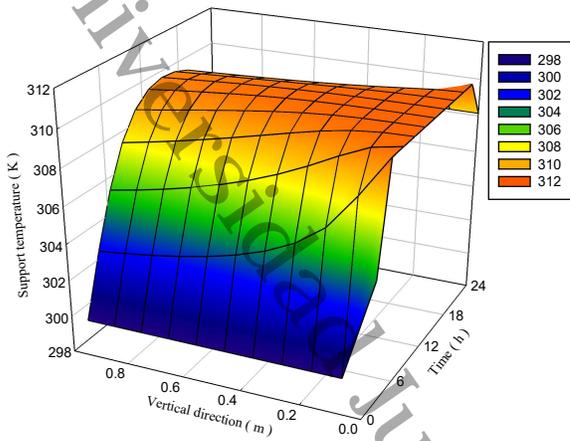


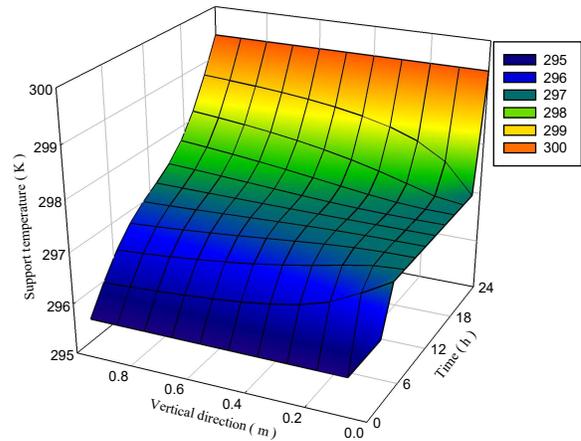
Figure 6. Moisture profile in the vegetation layer of the green roof during three seasons of the year in Villahermosa, Tabasco.

It was also possible to generate results on the behavior of the green-roof in the structural support layer during low water, rainy days and cold fronts. Figure 7.

a) Low water season



b) Rainy season



c) Cold front season

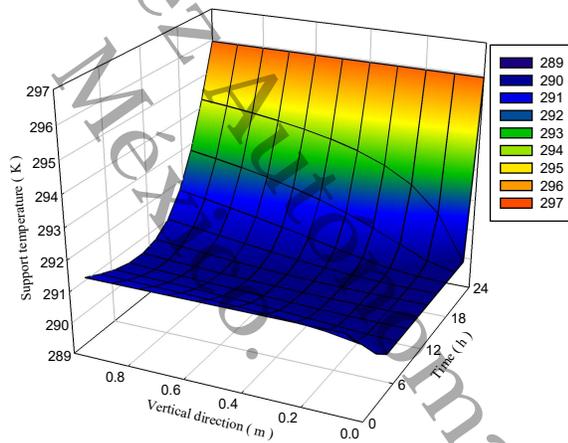


Figure 7. Temperature profile in the structural support layer.

Conclusions

A robust mathematical model applicable to real conditions was obtained that allows analyzing the effect of operating variables and design criteria, with implicit information on the physicochemical and biological phenomena related to the capacity of a green roof to reduce the penetration of the outside temperature into the interior of buildings in urban areas with a humid tropical climate. The model has been adjusted numerically based on data collected from an experimental unit located in Villahermosa, Tabasco, where, in a

humid tropical climate, plant species native to southeastern Mexico were established., *T. spathacea* and *T. pallida*, due to its resistance not only to the May season with maximum temperatures above 35 °C, but also to the intense rainfall in the city of Villahermosa, with an annual rainfall of 1972 mm. The mechanisms of heat transfer, conduction, convection and radiation are affected by the vegetation layer of the green roof not only by the change in the thermal characteristics of the materials but also by the evapotranspiration and metabolic processes that occur in the micro-ecosystem. It was found that the vegetation layer affects the heat transfer mechanisms, with a decrease in temperature of two degrees from the external temperature to the internal temperature of the building during the rainy and cold front seasons.

In the case of the dry season, the decrease is 1.5 degrees, considering a conventional roof, with respect to the experimental base with an ecological roof. Another interesting fact is the behavior of humidity, since, having a humid tropical climate, the common temperatures usually feel even higher because the humidity percentages in Villahermosa, Tabasco are around 95%, and in this work, it was found that there is a decrease in humidity of up to 30%, which would lead to a lower temperature sensation inside a building with a green roof.

Acknowledgments

Adriana de la Cruz would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) for the scholarship granted for her graduate studies.

Literature cited

- [1] Aguares M, Calvo-Schwarzwalder M, Font F, Myers T (2023) A mathematical model for the energy stored in green roofs. *Applied Mathematical Modelling* 115 (2023) 513–540.
- [2] Alexandri E, Jones P (2007) Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment* 42: 2835–2849.
- [3] Asgari-Targhi, A., & Klerman, E. B. (2019). Mathematical modeling of circadian rhythms. *WIREs Systems Biology and Medicine*, 11(2). <https://doi.org/10.1002/wsbm.1439>
- [4] Burden RI, Faires JD. (2005). *Numerical Analysis*. Thomson, Eighth Edition.
- [5] Chapra CC, Canale RP. (2010). *Numerical Methods for Engineers*. Mc Graw Hill, Sixth Edition.
- [6] Ghassem H, Arash E (2015) Numerical simulation of the dual effect of green roof thermal performance. *Energy Conversion and Management* 106:1418–1425.
- [7] Jaffal I, Ouldboukhitine S-E, Belarbi R (2012) A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43: 157–164
- [8] Jayalakshmy, M. S., & Philip, J. (2010) Thermophysical Properties of Plant Leaves and Their Influence on the Environment Temperature. *International Journal of Thermophysics*, 31(11-12), 2295-2304. <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0877-7>
- [9] Jacobson M, (2005) *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Second Edition.
- [10] Kreyszig E. (2006). *Advanced Engineering Mathematics*. Wiley, 9th Edition.
- [11] Kumar R, Kaushik SC (2005) Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment* 40: 1505–1511.
- [12] Lawrence, M. G. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225-234. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- [13] Lazzarin RM, Castellotti F, Busato F (2005) Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings* 37: 1260–1267.

- [14] Martens R, Bass B, Saiz-Alcazar S (2008) Roof–envelope ratio impact on green roof energy performance. *Urban Ecosystems* 11, 399–408.
- [15] Ouldboukhitine S, Belarbi R, Jaffal I, Trabelsi A (2011) Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment* 46: 2624–2631.
- [16] Palomo del Barrio E (1998) Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings* 27: 179–193.
- [17] Polo-Labarrios M.A, Quezada-García S, Sánchez-Mora H, Escobedo-Izquierdo M.A, Espinosa-Paredes G (2020) Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs. *Case Studies in Thermal Engineering* 21 (2020) 100697.
- [18] Poncin, S (2021) Energy Policies for Eco-Friendly Households in Luxembourg: A Study Based on the LuxHEI Model. *Environmental Modeling & Assessment*, 26(1), 37-61. <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09725-7>
- [19] Sailor DJ (2008) A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40: 1466–1478.
- [20] Sheng LX, Mari TS, Ariffin ARM, Hussein H (2011) Integrated sustainable roof design. *Procedia Engineering* 21: 846–852.
- [21] SMN, Servicio Meteorológico Nacional (2022). Normales climatológicas por Estado: Tabasco, Centro. Estación 27054, Villahermosa (DGE). Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/> Fecha de consulta 2 de septiembre de 2022.
- [22] Stanghellini C (1987) Transpiration of Greenhouse Crops and aid to climate management. *Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen Wageningen*, Postbus 43, 6700 AA Wageningen, The Netherlands.
- [23] Tabares-Velasco PC, Srebric J (2012) A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. *Building and Environment* 49: 310–323.
- [24] Zhang, K., P. McDowell, T., & Kummert, M. (2017, agosto 7). *Sky Temperature Estimation and Measurement for Longwave Radiation Calculation*. 2017 Building Simulation Conference. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.569>

- [25] Zhong Z (2008) Combined heat and moisture transport modelling for residential buildings. *U. S. National Institute of Standards and Technology Project Award No. 60NANB4D1091.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPÍTULO 4

Conclusiones generales

CONCLUSIONES GENERALES

La investigación sobre medir la rentabilidad de los techos verdes, así como saber si ayudan a la reducción del uso de aires acondicionados, a través de la disminución de temperatura en edificios urbanos en regiones con clima tropical húmedo, fueron la motivación de este trabajo, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Se aplicó un modelo matemático robusto, ajustado numéricamente respecto una base experimental ubicada en Villahermosa, Tabasco, con especies de plantas nativas del sureste de México, que resistieron a las condiciones de temporada de sequía, temporada de lluvias y de frente frío: *T. spathacea* y *T. pallida*.
- A través de un análisis de beneficio-costos de la instalación de un techo verde extensivo sobre una vivienda en climas tropicales se demostró una rentabilidad aceptable con relaciones B/C entre 1.1 y 3.8 con periodos de recuperación de la inversión de 3.4 a 8.9 años.
- Los costos de instalación de un techo verde extensivo en el sur de México varían de USD 33 m⁻² a USD 50 m⁻².
- El análisis de ciclo de vida permitió cuantificar la reducción de impactos potenciales cuando se instala un techo verde en comparación a un techo convencional. Se ha incluido la capacidad del techo verde para reducir emisiones de CO₂ equivalente, dado que la reducción de la acidificación, el material particulado, la eutrofización y el smog no han sido considerados aún en políticas públicas urbanas en México y existen escasas políticas de este tipo en otros países.
- La conversión de estos beneficios públicos en privados incrementaría considerablemente la rentabilidad de los techos verdes que, combinados con otras tecnologías verdes, tales como la captación pluvial y los paneles fotovoltaicos, los convertiría en un sistema clave para la infraestructura urbana sostenible.

Anexo 1

Evidencia de artículos



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
"Estudio en la Duda. Acción en la Fe"
 Secretaría de Investigación, Posgrado y Vinculación
 Dirección de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica

DICTAMEN

Ecossistemas y Recursos Agropecuarios
era@ujat.mx
 Teléfono/fax 01.993.3 58 15.00 Ext. 5041

Villahermosa, Tabasco, a 21 de febrero de 2023

Manuscrito— ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO DE LA INSTALACIÓN DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS EN CONDICIONES DE TRÓPICO HUMEDO

Registro — 3586ERA

Autores — Adriana de la Cruz Uribe, Miguel Ángel Jesús Castañeda, Rosa Cristina Boívar Fuentes, José Ramón Laines Canepa, José Roberto Hernández Barajas

Dictamen — Aceptado con correcciones

Comentarios— Los revisores indican que el manuscrito tiene información de interés, pero para aceptarse se requieren hacer las siguientes correcciones: 1) poner títulos en mayúsculas y minúsculas, y agregar a este el lugar donde se realizó el estudio. 2) Incluir en el resumen todos los elementos mínimos requeridos. 3) En la introducción se requiere citar la fuente de donde se obtuvo mucha de la información que se incluye en algunos párrafos, ya que de lo contrario se puede caer en plagio de información. 4) La metodología debe ser más descriptiva para entender de donde se obtuvieron los datos que se incluyen en las tablas. 5) La tabla 2 no es producto del estudio, con solo indicar las características del tipo de vivienda usada en el estudio es suficiente, ya que el interés del estudio no es conocer la eficiencia de todos los tipos de vivienda. 6) Se requiere mejorar la redacción en la discusión, además de profundizar la discusión y no solo indicar que se coincide o no con otros trabajos. 7) Es necesario centrar la discusión en el objetivo del trabajo y los resultados obtenidos. Otras observaciones se encuentran en los archivos adjuntos. En la versión corregida marcar en color los cambios realizados y anexar carta donde se respondan los comentarios de los revisores.

En espera de la versión corregida en un plazo máximo de una semana, me despido con saludos.

Dr. Efraín de la Cruz Lázaro
 Editor

C.p. Archivo

Track the status of your submission to Environmental Modeling & Assessment

Research Square <info@researchsquare.com>

15 de junio de 2024, 19:08

Para: "Dr. Adriana de la Cruz Uribe" <adry042@gmail.com>

Dear Dr. Adriana de la Cruz Uribe,

Congratulations on your manuscript submission to Environmental Modeling & Assessment. In partnership with Springer Nature, [Research Square](#) provides a private dashboard where you can track the status of your manuscript "Mathematical Model for the Heat Balance of a Green Roof in Humid Tropics Conditions" that is under consideration at Environmental Modeling & Assessment. To access your dashboard and start tracking the progress of your manuscript through the peer review process, please log in to your account:

[Log in to your account](#)

Although you chose not to share your manuscript as a preprint when you submitted it to the journal, you can still do so through your dashboard. Preprints are given a DOI and posted permanently online on Research Square, allowing for more collaboration opportunities, earlier citations, and community comments. If you are interested in this option, log in via the link above and then select "Post My Preprint".

Please note that the peer review process, including all editorial communications, will continue through the journal where you submitted your manuscript. All queries about the peer review process should be directed to the journal or to orsupport@springernature.com.

If you have any questions or feedback, [visit our Help Center](#) or [contact us](#).

Sincerely,

The Research Square Team

[Research Square](#)

A preprint platform that makes research communication faster, fairer, and more useful.

This email has been sent to adry042@gmail.com by Research Square.

[Privacy policy](#)

[Contact us](#)

Research Square Platform, LLC is a company registered in the United States under Federal Employer Identification Number (FEIN) 82-4431595 with its registered office at [601 West Main Street, Durham, NC, USA](#)

© 2022 Research Square Platform, LLC. All rights reserved.

Title: Mathematical Model for the Heat Balance of a Green Roof in Humid Tropics Conditions

RSID: rs-4588026

Anexo 2

Alojamiento de la tesis en el repositorio institucional

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de la tesis:	Modelo Matemático para la Estimación del Balance de Calor en un Techo Verde y su Aplicación en la Reducción del Consumo de Energía Eléctrica en Zonas Urbanas con Clima Tropical Húmedo.
Autor de la tesis:	Adriana de la Cruz Uribe
ORCID:	0009-0005-6069-1362
Resumen de la tesis:	<p>Desde la perspectiva de los procesos térmicos asociados, un techo verde reduce la transferencia de calor a través del techo de un edificio urbano, reduciendo así el consumo de energía eléctrica para enfriarlo. Este balance térmico puede estimarse a partir del uso de un modelo matemático de tipo mecanístico. Esta investigación desarrolló un modelo matemático que representa los fenómenos fisicoquímicos y biológicos directamente relacionados con la capacidad de una azotea verde para reducir la penetración de la temperatura exterior al interior de edificios en zonas urbanas con clima tropical húmedo, con el propósito principal de disminuir el consumo anual de energía eléctrica, reduciendo el tiempo de uso de aires acondicionados. El modelo se ajusta numéricamente con base en datos recabados en una unidad experimental ubicada en Villahermosa, Tabasco, donde se establecieron especies vegetales nativas del sureste de México. Se analizó la rentabilidad del proyecto de instalación de techos verdes extensivos en viviendas ubicadas en un clima tropical húmedo considerando el efecto de diversos parámetros sobre la relación beneficio-costos y el periodo de recuperación de la inversión. Los beneficios ambientales que brinda un techo verde fueron estimados a partir de un análisis de ciclo de vida. El análisis a partir del valor presente neto de los costos de instalación, mantenimiento, desmantelamiento y disposición final determinó que la relación beneficio-costos varía entre 1.1 y 3.8 con periodos de recuperación de 3.4 a 8.9 años.</p>
	Techo verde, Modelo, Trópico Húmedo, Cambio Climático, COVID, Sostenibilidad

<p>Palabras clave de la tesis:</p>	
<p>Referencias citadas:</p>	<p>Agrawal S, Tiwari GN (2015). Performance analysis in terms of carbon credit earned on annualized uniform cost of glazed hybrid photovoltaic thermal air collector. <i>Solar Energy</i> 115: 329-340. DOI: 10.1016/j.solener.2015.02.030</p> <p>Aguareles M, Calvo-Schwarzwalder M, Font F, Myers T (2023). A mathematical model for the energy stored in green roofs. <i>Applied Mathematical Modelling</i> 115 (2023) 513–540.</p> <p>Alexandri E, Jones P (2007). Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. <i>Building and Environment</i> 42: 2835–2849.</p> <p>Alexandri E, Jones P (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. <i>Building and Environment</i> 43: 480–493.</p> <p>Asgari-Targhi, A., & Klerman, E. B (2019). Mathematical modeling of circadian rhythms. <i>WIREs Systems Biology and Medicine</i>, 11(2). https://doi.org/10.1002/wsbm.1439</p> <p>Auld D, Wright J (2018). Carbon sequestering and green roofs technology: A benefit cost analysis. <i>Environmental Management and Sustainable Development</i> 7(1): 85-92. DOI: 10.5296/emsd.v7i1.12396</p> <p>Ayuntamiento de Mérida 2021-2024 (2022). Programa de estímulo a las acciones ante el cambio climático. www.merida.gob.mx. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.</p> <p>Banxico (2022a). Portal del mercado de valores. Banco de México. https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=tas. Fecha de consulta 7 de septiembre de 2022.</p> <p>Banxico (2022b). Encuesta sobre las expectativas de los especialistas en economía del sector privado: octubre de 2022. Banco de México, https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.</p> <p>Blank LT, Tarquin AJ (2011). <i>Engineering Economy</i>, Seventh edition, Mc Graw-Hill Education, USA.</p> <p>Blank, LT, Tarquin AJ (2018). <i>Engineering economy</i>. 8th Edition. McGraw-Hill Education. New York, USA. 656P</p>

	<p>Bliss DJ, Neufeld RD, Ries RJ (2009). Storm Water Runoff Mitigation Using a Green Roof. <i>Environmental Engineering Science</i> 26(2): 407–417.</p> <p>Boivin M, Lamy M., Gosselin A, Dansereau, B (2001). Effect of artificial substrate depth on freezing injury of six herbaceous perennials grown in a green roof system. <i>HortTechnology</i>, 11(3): 409–412.</p> <p>Bolívar Fuentes RC (2015). <i>Análisis del ciclo de vida de un techo ecológico como tecnología para el ahorro energético en pequeños inmuebles bajo condiciones de clima tropical húmedo</i>, Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, México.</p> <p>Burden RI, Faires JD (2005). <i>Numerical Analysis</i>. Thomson, Eighth Edition.</p> <p>Canul Gómez, WA (2014). <i>Efecto de las Condiciones Ambientales Sobre el Establecimiento y Crecimiento de Especies Nativas en un Techo Verde</i>. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, México.</p> <p>Carter T, Keeler A (2008). Life-cycle Cost–Benefit Analysis of Extensive Vegetated Roof Systems. <i>Journal of Environmental Management</i> 87 (2008) 350–363.</p> <p>CEFP (2022). Paquete económico 2023. Criterios Generales de Política Económica. Cámara de Diputados, LXV Legislatura. Centro de Estudios de Finanzas Públicas. https://www.cefp.gob.mx/indicadores/gaceta/2022/iescefp0342022.pdf Fecha de consulta 13 de diciembre de 2022.</p> <p>Chapra CC, Canale RP (2010). <i>Numerical Methods for Engineers</i>. Mc Graw Hill, Sixth Edition.</p> <p>Clark C, Adriaens P, Talbot B (2008). Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits. <i>Environmental Science and Technology</i> 42: 2155–2161.</p> <p>Cruz N.A., Córdova E.A (2013). <i>Efecto del Sustrato sobre el Crecimiento de Especies Tropicales para su uso Potencial en Techos Verdes</i>. Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, México.</p> <p>Currie BA, Bass B (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. <i>Urban Ecosystems</i> 11: 409–422.</p> <p>DOF (2019). Acuerdo con el que se establecen las bases preliminares del Programa de Prueba del Sistema de Comercio de Emisiones. Diario Oficial de la Federación. Gobierno de México, 1 de octubre.</p>
--	--

	<p>EPA, United States Environmental Protection Agency (2008a). <i>Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies: Urban Heat Island Basics</i>. Climate Protection Partnership Division in the USEPA's Office of Atmospheric Programs.</p> <p>EPA, United States Environmental Protection Agency (2008b). <i>Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies: Green Roofs</i>. Climate Protection Partnership Division in the USEPA's Office of Atmospheric Programs.</p> <p>Fuentes-Velasco M (2014). <i>Estimación de ahorro energético asociado a la instalación de un techo verde para el aislamiento térmico de un edificio bajo condiciones de clima tropical húmedo</i>, Tesis de Licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, México.</p> <p>Ghassem H, Arash E (2015). Numerical simulation of the dual effect of green roof thermal performance. <i>Energy Conversion and Management</i> 106:1418–1425.</p> <p>GOCDMX (2022). Código Fiscal de la Ciudad de México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Fecha de consulta 2 de enero de 2023.</p> <p>H. Congreso del Estado de Jalisco (2020). Ley de hacienda municipal del Estado de Jalisco. http://congresoweb.congresoajal.gob.mx/. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.</p> <p>H. Congreso del Estado de Nuevo León (2021). Ley de hacienda para los municipios del Estado de Nuevo León. www.hcnl.gob.mx/trabajo legislativo/leyes/. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.</p> <p>Hien WN, Yok TP, Yu C (2007). Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. <i>Building and Environment</i> 42: 25–54.</p> <p>Hong T, Kim J, Koo C (2012). LCC and LCCO₂ analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. <i>Energy and Buildings</i> 45: 229-239. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.006</p> <p>IEA (2020). World Energy Outlook 2020, International Energy Agency, Paris. www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.</p> <p>ISO 14044 (2006). Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.</p> <p>Jacobson M (2005). <i>Fundamentals of Atmospheric Modeling</i>. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Second Edition.</p>
--	---

Jaffal I, Ouldboukhitine S-E, Belarbi R (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43: 157–164

Jáuregui, E (2004). *La variabilidad climática en los registros instrumentales de México*. En: Cambio Climático. Una visión desde México. Martínez J y Fernández Bremauntz A (compiladores). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Ciudad de México, México.

Jayalakshmy, M. S., & Philip, J (2010). Thermophysical Properties of Plant Leaves and Their Influence on the Environment Temperature. *International Journal of Thermophysics*, 31(11-12), 2295-2304. <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0877-7>

Koroxenidis E, Theodosiou T (2021). Comparative environmental and economic evaluation of green roofs under Mediterranean climate conditions - Extensive green roofs a potentially preferable solution. *Journal of Cleaner Production* 311: 127563. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.127563](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127563)

Kreyszig E. (2006). *Advanced Engineering Mathematics*. Wiley, 9th Edition.

Kumar R, Kaushik SC (2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment* 40: 1505–1511.

Lazzarin RM, Castellotti F, Busato F (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings* 37: 1260–1267.

Li W.C., Yeung K.K.A (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment* 3: 127–134.

López-González BG, Camacho AD, Martínez-Rodríguez MC, Marcelin-Aranda M (2020) Techos verdes: Una estrategia sustentable. *Revista Tecnología en Marcha* 33: 68-79. DOI: [10.18845/tm.v33i3.4389](https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4389)

Lundholm JT, Peck SW (2008). Introduction: Frontiers of green roof ecology. *Urban Ecosystems* 11: 335–337.

Manso M, Sousa V, Matos Silva C, Oliveira Cruz C (2021a). The role of green roofs in post COVID-19 confinement: An analysis of willingness to pay. *Journal of Building Engineering* 44: 103388. DOI: [10.1016/j.jobe.2021.103388](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103388)

Manso M, Teotónio I, Matos Silva C, Oliveira Cruz C (2021b). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative

	<p>evidence. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>, 135: 110111. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110111</p> <p>Martens R, Bass B, Saiz-Alcazar S (2008). Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance. <i>Urban Ecosystems</i> 11, 399–408.</p> <p>Melnick, J (1958). Manual de Proyectos de Desarrollo Económico. Organización de las Naciones Unidas, Programa CEPAL/AAT.</p> <p>Mentens J, Raes D, Hermy M (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? <i>Landscape and Urban Planning</i> 77: 217–226.</p> <p>Monterusso M., Rowe B, Rugh C (2005). Establishment and persistence of <i>Sedum</i> spp and native taxa for green roof applications. <i>HortScience</i>, 40 (2):391–396.</p> <p>Munier N (2013). <i>Project Management for Environmental, Construction and Manufacturing Engineers: A Manual for putting Theory in Practice</i>. Springer. USA.</p> <p>Nordman EE, Isely E, Isely P, Denning R (2018). Benefit-cost analysis of stormwater green infrastructure practices for Grand Rapids, Michigan, USA. <i>Journal of Cleaner Production</i> 200: 501-510. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.152</p> <p>Nurmi V, Votsis A, Perrels A, Lehvavirta S (2016). Green roof cost-benefit analysis: Special emphasis on scenic benefits. <i>Journal of Benefit-Cost Analysis</i> 7: 488–522. DOI: 10.1017/bca.2016.18</p> <p>OECD, (2007). Contribution to the United Nations Commission on Sustainable Development 15. <i>Energy for Sustainable Development</i>.</p> <p>OECD, (2010). Interim Report of the Green Growth Strategy: Implementing our commitment for a sustainable future. <i>Meeting of the OECD Council at Ministerial Level: 27–28</i>.</p> <p>OECD, (2021). Effective carbon rates 2021: Pricing carbon emissions through taxes and emissions trading. Organization for Economic Co-operation and Development. https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2021-0e8e24f5-en.htm. Fecha de consulta 7 de diciembre de 2022.</p> <p>Ondimu SN, Murase H (2007). Combining Galerkin Methods and Neural Network Analysis to Inversely Determine Thermal Conductivity of Living Green Roof Materials. <i>Biosystems Engineering</i> 96(4): 541–550.</p> <p>Opsal, I., Zahradnik, J (1999). Elastic finite-difference method for irregular grids, <i>Geophysics</i> 64(1): 240–250.</p>
--	--

Ordóñez E, Zetina C, Pérez M (2012). Supervivencia y cobertura de plantas en techos verdes durante el estiaje en Yucatán. *Ingeniería*, vol. 16, núm. 2, mayo-agosto, 2012, pp. 93–107.

Ordóñez E, Pérez M (2015). Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR. *Acta Universitaria*, 25(5), 11-19.

Ouldoukhitine S, Belarbi R, Jaffal I, Trabelsi A. (2011). Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment* 46: 2624–2631.

Palomo del Barrio, E (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings* 27: 179–193.

Peck S, Kuhn M (2003). *Design Guidelines for Green Roofs*. Ontario Association of Architects (OAA) and Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC).

Polo-Labarríos M.A, Quezada-García S, Sánchez-Mora H, Escobedo-Izquierdo M.A, Espinosa-Paredes G (2020). Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs. *Case Studies in Thermal Engineering* 21 (2020) 100697.

Poncin, S (2021). Energy Policies for Eco-Friendly Households in Luxembourg: A Study Based on the LuxHEI Model. *Environmental Modeling & Assessment*, 26(1), 37-61. <https://doi.org/10.1007/s10666-020-09725-7>

Rasul MG, Arutla LKR (2020). Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment. *Energy Reports* 6: 503-508. DOI: [10.1016/j.egy.2019.09.015](https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.015)

Sailor DJ (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40: 1466–1478.

Sailor DJ, Hutchinson D, Bokovoy L (2008). Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. *Energy and Buildings* 40: 1246–1251.

Saiz S (2004). *Greening the Dwelling: A Life Cycle Energy Analysis of Green Roofs in Residential Buildings*. Tesis de Maestría en Ciencias Aplicadas. Universidad de Toronto.

Sandoval V, Suárez F, Vera S, Pinto C, Victorero F, Bonilla C, Gironás J, Bustamante W, Rojas V, Pastén P (2015). Impact of the properties of a green roof substrate on its hydraulic and thermal behavior. *Energy Procedia* 78: 1177–1182.

SENER (2014). *Datos Estadísticos del Sistema de Información Energética*, Secretaría de Energía, Sistema de Información Energética, Subsecretaría de Electricidad, recurso electrónico: <http://www.sener.gob.mx>, último acceso 9 de mayo de 2016.

Shafique M, Azam A, Rafiq M, Ateeq M, Luo X (2020). An overview of life cycle assessment of green roofs. *Journal of Cleaner Production* 250: 119471. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.119471](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119471)

Sheng LX, Mari TS, Ariffin ARM, Hussein H (2011). Integrated sustainable roof design. *Procedia Engineering* 21: 846–852.

Shin E, Kim H (2019). Benefit–cost analysis of green roof initiative projects: The Case of Jung-Gu, Seoul". *Sustainability* 11: 3319. DOI: [10.3390/su11123319](https://doi.org/10.3390/su11123319)

Sholarin E, Awange J (2016). *Environmental Project Management. Principles, methodologies and processes*. Springer.

Simmons MT, Gardiner B, Windhager S, Tinsley J (2008). Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a subtropical climate. *Urban Ecosystems* 11: 339–348.

SMN (2022). Normales climatológicas por Estado: Tabasco, Centro. Estación 27054, Villahermosa (DGE). Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/> Fecha de consulta 2 de septiembre de 2022.

Spala A, Bagiorgas HS, Assimakopoulos MN, Kalavrouziotis J, Matthopoulos D, Mihalakakou G (2008). On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy* 33: 173–177.

Spolek G (2008). Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. *Urban Ecosystems* 11: 349–359.

Stanghellini C (1987). Transpiration of Greenhouse Crops and aid to climate management. *Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen Wageningen*, Postbus 43, 6700 AA Wageningen, The Netherlands.

Tabares-Velasco PC, Srebric J (2012). A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. *Building and Environment* 49: 310–323.

The World Bank Group, Climate Change Knowledge Portal (2012). Fuente electrónica (en línea): <http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm>

	<p>USEPA (2012). Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI) version 2.1. User's guide. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, EPA/600/R-12/554, July.</p> <p>Van Renterghem T, Botteldooren D (2008). Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. <i>Journal of Sound and Vibration</i> 317: 781–799.</p> <p>Van Renterghem T, Botteldooren D (2009). Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. <i>Building and Environment</i> 44: 1081–1087.</p> <p>Van Woert N, Rowe D, Andresen J, Rugh C, Fernández T, Xiao, L (2005a). Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. <i>Journal of Environmental Quality</i> 34:1036–1044.</p> <p>Van Woert N, Rowe D, Andresen J, Rugh C, Xiao L (2005b). Watering regime and green roof substrate design affect <i>Sedum</i> plant growth. <i>HortScience</i> 40(3):659–664.</p> <p>Woodward DG (1997). Life cycle costing theory, information, acquisition and application. <i>International Journal of Project Management</i> 15: 335–344.</p> <p>Yang HS, Kang J, Choi MS (2012). Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. <i>Building and Environment</i> 50: 44–55.</p> <p>Yang J, Yu Q, Gong P (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. <i>Atmospheric Environment</i> 42: 7266–7273.</p> <p>Zhang, K., P. McDowell, T., & Kummert, M. (2017, agosto 7). <i>Sky Temperature Estimation and Measurement for Longwave Radiation Calculation</i>. 2017 Building Simulation Conference. https://doi.org/10.26868/25222708.2017.569</p> <p>Zhong Z (2008). Combined heat and moisture transport modelling for residential buildings. <i>U. S. National Institute of Standards and Technology Project Award No. 60NANB4D1091</i>.</p>
--	---