

## Análisis beneficio-costo de techos verdes extensivos en condiciones del trópico húmedo en Villahermosa, México

### Cost benefit analysis of extensive green roofs under tropic humid conditions in Villahermosa, Mexico

Adriana de la Cruz-Uribe<sup>1</sup> ,  
 Miguel Ángel Jesús-Castañeda<sup>1</sup> ,  
 Rosa Cristina Bolívar-Fuentes<sup>1</sup> ,  
 José Ramón Laines-Canepa<sup>1</sup> ,  
 José Roberto Hernández-Barajas<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5, CP. 86287, Villahermosa, Tabasco, México.

\*Autor de correspondencia: roberto.hernandez@ujat.mx

#### Artículo científico

Recibido: 16 de enero 2023

Aceptado: 24 de abril 2023

**Como citar:** de la Cruz-Uribe A, Jesús-Castañeda MA, Bolívar-Fuentes RC, Laines-Canepa JR, Hernández-Barajas JR (2023) Análisis beneficio-costo de techos verdes extensivos en condiciones del trópico húmedo en Villahermosa, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(1): e3586. DOI: 10.19136/era.a10n1.3586

**RESUMEN.** El objetivo fue analizar 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 se estimaron a partir del análisis de ciclo de vida, mientras que el análisis de costos unitarios permitió determinar el efecto de la disponibilidad de materiales sobre los costos de instalación. El análisis monetizó dos beneficios ambientales: el ahorro de energía eléctrica y la captura de carbono, a partir del valor presente neto de los costos de instalación, mantenimiento, desmantelamiento y disposición final. Se 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.

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

**ABSTRACT.** The objective was to analyze the profitability of the project for the installation of extensive green roofs on houses located in a humid tropical climate, considering the effect of various parameters on the benefit-cost ratio and the payback period of the investment. The environmental benefits were estimated from the life cycle analysis, while the unit cost analysis allowed determining the effect of material availability on installation costs. The analysis monetized two environmental benefits: electricity savings and carbon sequestration, based on the net present value of installation, maintenance, dismantling and disposal costs. The benefit-cost ratio was found to range from 1.1 to 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 reward with carbon credits to the owner.

**Key words:** Climate change, COVID, investment, payback period, sustainability.

## INTRODUCCIÓN

Ante fenómenos como el calentamiento global se estima que las temperaturas de zonas urbanas irán en ascenso y, con ello, el consumo de energía eléctrica atribuido a las necesidades adicionales de enfriamiento. Tomando como línea base al 2020, se prevé que el consumo de energía incremente hasta un 9% hacia el 2030, especialmente en países emergentes (IEA 2020). Por lo anterior, la promoción del ahorro y la eficiencia energética asociada con diversos requerimientos de consumo eléctrico en las actividades humanas puede coadyuvar en la sostenibilidad energética (López-González *et al.* 2020, Hussien *et al.* 2023). 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 (Andric *et al.* 2020). 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; concluyendo que los techos extensivos causan menor impacto ambiental debido a la menor cantidad de materiales empleados durante su construcción y mantenimiento. Mientras que Koroxenidis y Theodosiou (2021) en un análisis comparativo del ciclo de vida de techos verdes y techos convencionales en clima mediterráneo encontró 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<sup>-2</sup> a USD 174 m<sup>-2</sup>. En tanto que Manso *et al.* (2021b) reportaron un costo entre EUR 99 m<sup>-2</sup>

y EUR 362 m<sup>-2</sup> en función del país y del tipo de techo verde. Debido a lo anterior el objetivo de este trabajo 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.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área y objeto de estudio

La ciudad de Villahermosa está situada al sureste de México en las coordenadas 17° 59' 48" LN, 92° 55' 42" LO, predomina un clima cálido húmedo con abundantes lluvias (Köppen Am: clima tropical monzónico) con temperaturas máximas normales de 35.4 y 27.9 °C, para mayo y enero, respectivamente, y temperaturas mínimas normales de 24.5 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. Se consideró la instalación hipotética de un techo verde extensivo sobre un edificio residencial en la zona urbana de Villahermosa con diferentes niveles o pisos habitables, áreas de techado, niveles de consumo de energía eléctrica, número de equipos de acondicionamiento de aire y considerando techos convencionales o techos verdes.

### Análisis de ciclo de vida

Se realizó un análisis de ciclo de vida (LCA, acrónimo en inglés de Life Cycle Assessment) (ISO 14044 2006), el cual se llevó a cabo para proveer de información sobre impactos para desarrollar un análisis de beneficio-costo en techos verdes extensivos instalados en clima tropical húmedo, considerando la 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 Im-

pact 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. 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. Como aproximación preliminar, se analizaron 24 tipos de vivienda considerando los siguientes factores: Número de niveles habitables (L: 1 y 2), área efectiva de techado (A: 47 y 98 m<sup>2</sup>), 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). 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.

### 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 m<sup>2</sup> en octubre de 2022. Los costos unitarios fueron proporcionados por cinco empresas reconocidas a

nivel nacional 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 de insumos como fertilizantes, herramientas o refacciones es de MXN 1 150 para el primer año y que incrementa en función de la inflación proyectada.

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:

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

Donde:  $P$  es el valor presente 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:

$$i_g = i + f + if$$

La sumatoria de los valores presentes de la inversión y de cada uno de los costos de operación, mantenimiento y desmantelamiento del proyecto

**Tabla 1.** Inventario de los elementos para la 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 <sup>2</sup> para la vivienda de un solo nivel y de 98 m <sup>2</sup> de área total del techo.
Materiales del techo convencional	De hormigón. De 47 y 98 m <sup>2</sup> , 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)

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 de 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 m<sup>2</sup>, 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-costo (B/C) del techo verde se realizó bajo los criterios descritos por Norman *et al.* (2018). Una vez conocidos los beneficios positivos, beneficios negativos y costos se empleó la relación planteada en Blank y Tarquin (2018):

$$\frac{B}{C} = \frac{BP - BN}{C}$$

Donde:  $B/C$  es la relación beneficio-costo,  $BP$  son los beneficios positivos,  $BN$  son los beneficios negativos y  $C$  son los costos del proyecto, el cual es rentable si la relación es mayor que 1. Los beneficios positivos (BP) 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, 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<sub>2</sub> 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.

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 tonelada<sup>-1</sup> para el 2030, como reporta la 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 CO<sub>2</sub> 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 tonelada<sup>-1</sup> 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 (SEMARNAT 2019). Por ello, y para analizar el efecto de este beneficio, se considera un intervalo conservador de MXN 10 a 30 tonelada<sup>-1</sup> 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 la Ciudad de México se otorga un descuento del 10% (Gobierno de la Ciudad de México 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). 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, como riego, poda, deshierbe y fertilización.

## RESULTADOS

En la Tabla 2 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. 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, 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.

Con respecto a los impactos ambientales potenciales durante el ciclo de vida, en la Tabla 3 se observa una disminución de las emisiones de carbono en las viviendas que poseen techo verde en comparación con las viviendas con techo convencional. En particular, existe una disminución del 3.6% de emisiones para la vivienda 1L-47A-1E-GR de 47 m<sup>2</sup>, de un solo nivel, con techo verde y consumo de energía de 5.2 MWh (220.9 tonelada CO<sub>2</sub> eq anuales) en comparación con la misma vivienda 1L-47A-1E-CR, con techo convencional (228.8 tonelada CO<sub>2</sub> eq anuales). La disminución máxima de emisiones de carbono fue de 12%, para la vivienda de 98 m<sup>2</sup> 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

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

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

**Tabla 3.** 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 (tonelada CO <sub>2</sub> eq)	Acidificación (kg SO <sub>2</sub> eq)	Materia particulada (kg PM <sub>2.5</sub> eq)	Eutrofización (kg N eq)	Smog (kg O <sub>3</sub> 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	312.1	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

del techo verde en este tipo de vivienda representa una disminución de 72 t de CO<sub>2</sub> eq anuales.

Para determinar la relación B/C de la instalación de techos verdes se consideró el tipo de

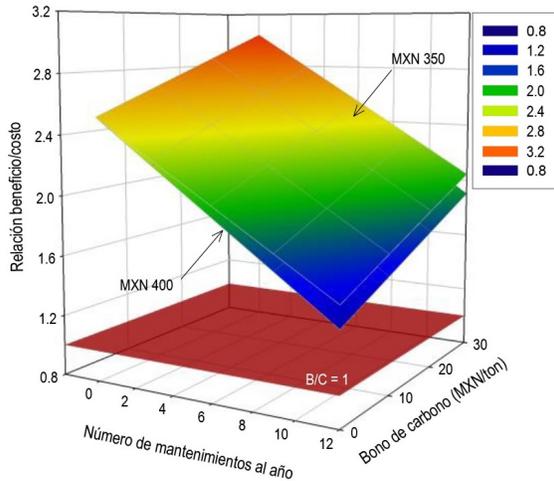
vivienda 2L-98A-3E-GR para realizar el análisis de sensibilidad paramétrica considerando el costo unitario del servicio de mantenimiento del techo verde (honorarios por contratación de personal de jardinería), el número de mantenimientos al año, el precio del bono de carbono, los dos escenarios (más 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 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 un entorno económico con  $i = 6.6\%$  y  $f = 3.3\%$ , que corresponde a la etapa pre-COVID. 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 tonelada<sup>-1</sup> 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 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) personal de jardinería para mantenimiento con 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 de 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

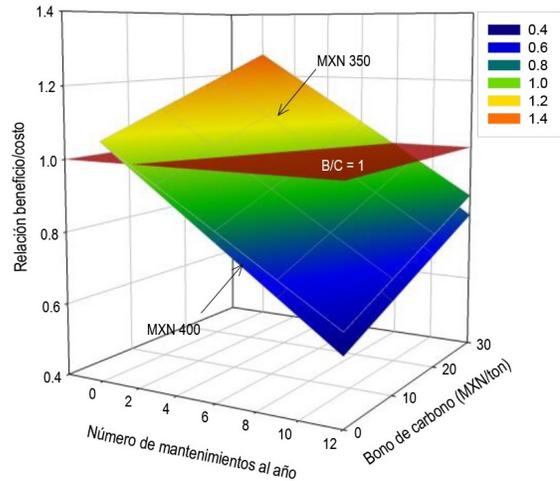
materiales con costos unitarios muy elevados). En ese escenario, no es rentable, ya que la B/C es menor de 1, si se consideran más de seis acciones de mantenimiento al año sin importar el precio por bono de carbono y el costo unitario por el servicio de mantenimiento. Por el contrario, es rentable con menos de seis 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 tonelada<sup>-1</sup> 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), para cualquier situación de precio del bono de carbono, número y costo del servicio de mantenimiento, la relación B/C es mayor de 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 es de 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 la rentabilidad. Por el contrario, si se incentiva con un bono de MXN 30 tonelada<sup>-1</sup> 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 bajas (etapa COVID) lo que asegura una alta rentabilidad y un periodo de recuperación de la inversión de 3.4 años. 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 disponi-

a)

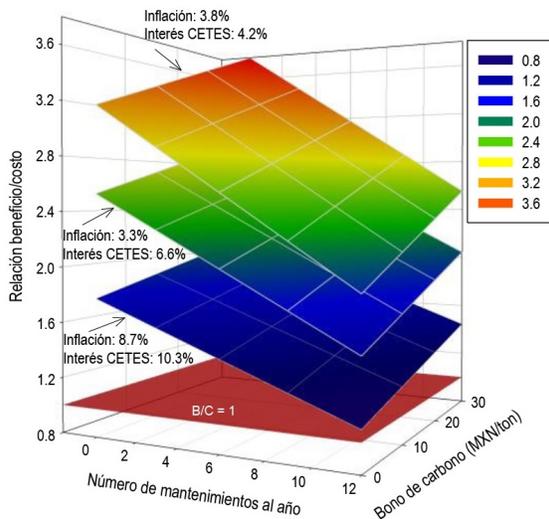


b)

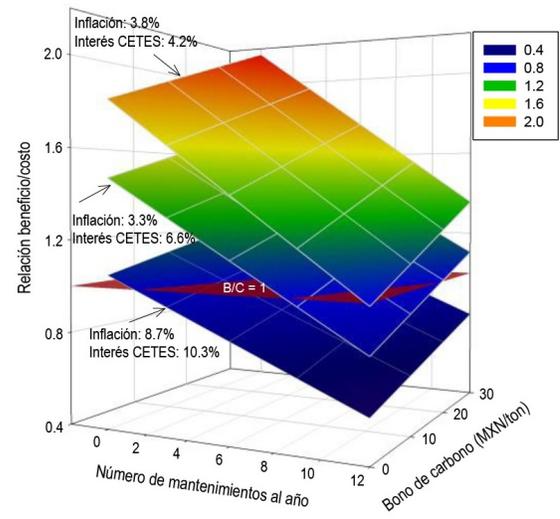


**Figura 1.** Efecto de la cuota de mantenimiento sobre la relación beneficio-costo para el escenario más probable y el peor escenario.

a)



b)



**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.

bilidad 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, 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 es de 1.27 con una recuperación a 6.4

**Tabla 4.** Resumen del análisis beneficio-costo de la instalación de techos verdes extensivos en climas tropicales.

Entorno económico	Escenario	Costo de instalación (MXN)	Acción de Mantenimiento		Bono de carbono (MXN tonelada <sup>-1</sup> )	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
COVID	Peor escenario	68 869	-	0	30	1.77	6.3
			-	0	30	3.80	3.4
			-	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
			-	0	30	1.27	6.4

años considerando un bono de MXN 30 tonelada<sup>-1</sup> y que el mantenimiento sea realizado por el propietario.

En la Tabla 4 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. Los resultados indican que la instalación de un techo verde extensivo en una vivienda bajo clima tropical, con consumo de energía eléctrica elevado por el uso de equipos de aire acondicionado, es rentable bajo un conjunto de condiciones económicas, considerando algunos beneficios ambientales monetizables e incluyendo un descuento en impuestos. En términos generales, la relación B/C varía de 1.08 a 3.8 en función de que el propietario realice las acciones de mantenimiento por sí mismo; o bien, que se presente 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, la instalación de un techo verde extensivo es rentable aún sin la existencia de un bono de carbono, aunque con periodos de recuperación de inversión 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, 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 m<sup>2</sup> 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 y 50 m<sup>-2</sup> los cuales son menores 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 y 75 m<sup>-2</sup> (López-González *et al.* 2020). Debe observarse que este estudio consideró costos de instalación en Villahermosa y su zona conurbana y que estos resultados podrían ser diferentes en otras regiones del país. 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 bajo las condiciones de estudio. Las simulaciones obtenidas con el programa IE4B dieron como resultado una disminución en 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 4). En particular, cuando se considera el precio del bono de carbono como un beneficio del techo verde, la relación B/C incrementa de forma significativa. Lo que concuerda con lo reportado por Auld y Wright (2018) quienes obtuvieron un VPN negativo; pero 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 de 1.17 para un techo verde extensivo en Seúl (Corea del Sur) considerando múltiples beneficios ambientales. 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, mientras que en el presente estudio las condiciones de clima tropical húmedo imperan casi todo el año. En un estudio realizado por Nurmi *et al.* (2016) en Helsinki, Finlandia, reportan que la 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 la B/C es de 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. Además, debe considerarse que en este estudio no se analizaron los efectos de tratados comerciales y las facilidades de acceso a materiales de instalación de techos verdes, lo cual podría incidir en que las relaciones B/C aquí reportadas sean razonablemente altas en comparación a otros países. 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, encontrando que el 68% de los encuestados habrían deseado tener acceso a un área verde propia dado que los parques públicos fueron cerrados. En este estudio se ha encontrado que, a pesar de un entorno económico desfavorable como la etapa Post-COVID donde prevaleció una tasa de interés y de inflación altas, la 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 de la instalación de un techo verde extensivo sobre una vivienda en climas tropicales tiene una rentabilidad aceptable con relaciones B/C entre 1.1 y 3.8, y 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 a pesar de entornos económicos desfavorables. Los costos de instalación de un techo verde extensivo en el sur de México varían de USD 33 a 50 m<sup>-2</sup>, un intervalo significativamente bajo en comparación a otros países. Como resultado, la instalación de techos verdes extensivos es rentable por sí misma, lo que convierte a esta tecnología en un elemento clave para el desarrollo de infraestructura urbana sostenible.

## AGRADECIMIENTOS

Adriana de la Cruz y Miguel Ángel Jesús de-  
sean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y

Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para  
realizar sus estudios de posgrado.

## LITERATURA CITADA

- Andric I, Kamal A, Al-Ghamdi SG (2020) Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate: Case study of Qatar. *Energy Reports* 6: 2476-2489. DOI: 10.1016/j.egy.2020.09.006.
- 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.
- Auld D, Wright J (2018) Carbon sequestering and green roofs technology: A benefit cost analysis. *Environmental Management and Sustainable Development* 7: 85-92. DOI: 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](http://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.
- Gobierno de la Ciudad de México (2022). Código Fiscal de la Ciudad de México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. <https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/index.php/leyes/codigos>. 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.congresojal.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/](http://www.hcnl.gob.mx/trabajo_legislativo/leyes/). Fecha de consulta: 7 de diciembre de 2022.
- Hong T, Kim J, Koo C (2012) LCC and LCCO<sub>2</sub> analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. *Energy and Buildings* 45: 229-239.
- Hussien A, Jannat N, Mushtaha E, Al-Shammaa A (2023) A holistic plan of flat roof to green-roof conversion: Towards a sustainable built environment. *Ecological Engineering* 190: 106925. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106925.
- IEA (2020) *World Energy Outlook 2020*, International Energy Agency, Paris. [www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020](http://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. <https://www.iso.org/standard/38498.html>. Fecha de consulta: 2 de enero de 2023.
- 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.
- López-González BG, Camacho AD, Martínez-Rodríguez MC, Marcelin-Aranda M (2020) Techos verdes: Una estrategia sustentable. *Revista Tecnología en Marcha* 33: 68-79.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- SEMARNAT (2019) Acuerdo con el que se establecen las bases preliminares del Programa de Prueba del Sistema de Comercio de Emisiones. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Gobierno de México, 1 de octubre. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5573934](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5573934). Fecha de consulta 2 de enero de 2023.
- 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.
- 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.
- 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. <https://www.epa.gov/chemical-research/tool-reduction-and-assessment-chemicals-and-other-environmental-impacts-traci>. Fecha de consulta: 2 de enero de 2023.