

# Evaluación económica y ambiental de diseños estructurales de edificaciones mediante análisis de ciclo de vida basado en entradas y salidas

*Environmental and economic assessment in buildings structural designs by input/output-life cycle analysis*

■ ■ ■ ■  
Julio-César Contreras-Jiménez<sup>1</sup>, Fernando Morales-Mendoza<sup>2</sup>, Ramón Corona-Armenta<sup>3</sup>, Oscar Montaña-Arango<sup>3</sup> y Joselito Medina-Marín<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México)

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Yucatán (México)

<sup>3</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8177>

En las últimas décadas el mayor consumo de energía proveniente de fuentes

no renovables ha provocado una gran contaminación ambiental y se estima que tan solo los edificios, la industria y el transporte están vinculados con el 40% del consumo energético mundial [1]. Además, la industria de la construcción es una de las más contaminantes debido a que los materiales de construcción consumen grandes cantidades de energía para ser fabricados y, también, ocasionan un consumo de recursos naturales considerable. En México, el sector de la construcción tiene un gran impacto ambiental ya que ocupa el cuarto lugar en cuanto a generación de contaminantes aportando el 11.5 % [2].

Las herramientas para la evaluación del impacto ambiental han permitido identificar áreas de oportunidad en los distintos tipos de industria para reducir el efecto adverso de los productos y de su correspondiente cadena de suministro. En la industria de la construcción, el Análisis de Ciclo de Vida o ACV es una de las herramientas más utilizadas para realizar la evaluación ambiental de los materiales de construcción, tanto de manera aislada como de la edificación vista como un todo. Aunque su uso comenzó en los EUA durante la década de los sesentas, se ha popularizado ampliamente en el mundo [3]. En general, el ACV ha demostrado tener un buen funcionamiento en la evaluación de impacto ambiental de procesos [4] y se ha normado su uso con la ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 [5].

La aplicación del ACV en el sector de la edificación aún es limitada. A diferencia de los productos de fabricación en serie, las edificaciones tienen un ciclo de vida más largo y ha sido necesario incorporar una herramienta denominada Análisis de Coste de Ciclo de Vida o CCV. Esta herramienta evalúa el costo total de un activo a

lo largo del tiempo, incluyendo la adquisición, mantenimiento y desecho [6] y está regulada por la ISO 15686-5 [7]. El uso del CCV ha motivado la búsqueda de nuevos diseños de edificaciones con un mejor uso energético [8] y apoyado la toma de decisiones en proyectos de inversión [9]. El uso del ACV en la industria de la edificación suele reportar variación en los resultados debido a las características únicas de cada proyecto, la larga duración de las edificaciones, la mano de obra y técnica utilizada, las distancias desde los proveedores de materiales a la obra y la calidad de los datos [10]. Además, la aplicación del ACV en las edificaciones está limitada por la incertidumbre, la complejidad y la naturaleza dinámica de los sistemas de construcción [11]. En general, el ACV en la construcción es costoso e impráctico; la literatura sobre las aplicaciones del ACV en los edificios demuestran que la mayoría son estudios de caso basados en un ACV simplificado, y con un enfoque hacia el mejor uso de la energía [12].

El ACV puede ser por procesos o por interacción económica, y un híbrido que combina ambos. El ACV por procesos requiere una gran cantidad de datos, tiempo y esfuerzo, y aunque fueran resueltos estos requerimientos los resultados pueden ser muy diferentes [13]. En cuanto al ACV por interacción económica, conocido como IO-ACV (de *Input Output*, Entradas Salidas), está basado en matrices con datos de los sectores económicos relacionados en las etapas del ciclo de vida del producto. El IO-ACV ha ganado aceptación por las limitaciones del ACV por procesos y el *Institute of Carnegie Mellon University* desarrolló un modelo IO-ACV que denominó EIO-LCA (*Economic Input Output – Life Cycle Assessment*) basado en información de los sectores económicos de los EUA. Hace varios años, los sectores económicos fueron desregulados en los EUA y la información ambiental se ha vuelto limitada [14]. Por otra parte, la Comisión Europea impulsó el proyecto denominado *World Input-Output Database* (WIOD) y que tiene por objetivo recopilar e intercambiar tablas de datos económicos para desarrollar un modelo Input-Output con datos de 40 países en todo el mundo [15]. Actualmente, se tienen casos documentados sobre la conveniencia del modelo IO-ACV en proyectos pequeños de construcción en las diferentes fases del ciclo de vida de cada [16].

En el caso de México, la aplicación del ACV en el sector de la edificación ha sido dirigida principalmente por iniciativas independientes, declaraciones ambientales de

productos y en general, los avances son percibidos aún como insuficientes [17]. A lo anterior, se añade la falta de exigencias de leyes y reglamentos, estímulos y conocimiento del uso e interpretación del ACV en este sector y que las bases de datos en el sector de la construcción de México son inexistentes. Incluso, el proyecto WIOD mencionado con anterioridad no cuenta con información en este sector para México.

Este trabajo analiza la aplicabilidad del modelo IO-ACV para evaluar opciones distintas de diseño estructural en contextos con datos ambientales escasos o con pocos estudios de ACV sobre edificaciones o materiales de construcción. El método denominado EIO-LCA (*Economic Input-Output*) del *Institute of Carnegie Mellon University* está basado en el modelo IO-ACV y aunque funciona con datos de los sectores económicos de los Estados Unidos, en esta investigación se estudió su utilidad para un contexto como el de México y si podría aproximar las estimaciones de CO<sub>2</sub> de manera aceptable con respecto a un ACV convencional.

Al final se desarrolló una propuesta de evaluación ambiental práctica y simple en dos etapas: la primera, una combinación del IO-ACV de los materiales con los impactos potenciales del transporte con huella de carbono del transporte de los materiales, y la segunda, un ACV por procesos convencional para la estructura de la edificación de tal manera que se tuvieran estimaciones más precisas. Los resultados obtenidos entre ambas etapas fueron comparados para establecer el grado de utilidad de este método en el contexto de interés.

Este artículo está estructurado de la manera siguiente. La sección 1 discute la aplicación del IO-ACV en el diseño estructural y particularmente, en el contexto de México. La sección 2 trata sobre el modelo de evaluación ambiental propuesto y en la sección 3 se presentan los resultados obtenidos a partir de aplicar tal modelo a cuatro casos de diseño estructural en México. Finalmente, en la secciones 4 y 5 se discuten los resultados y las conclusiones obtenidas del desarrollo.

## 1. CONTEXTO DE APLICACIÓN

El ACV es una de las herramientas más utilizadas en la evaluación ambiental de las edificaciones, y particularmente en el diseño estructural, el cual incluye el diseño de cimientos, dimensiones de trabes, columnas, vigas y techos.

Actualmente, en México existe un creciente interés por parte de las empresas,

autoridades, contratistas y la sociedad, en general, por incorporar la perspectiva sustentable en el diseño de las edificaciones [18]. A diferencia de los países desarrollados, en México se prefiere enfocar lo sustentable hacia las viviendas de interés social en vez de orientar lo sostenible hacia los estratos socioeconómicos altos; el enfoque es buscar el mejor consumo de la energía y del agua.

Por otra parte, una de las estrategias para reducir el impacto ambiental de los edificios ha sido la evaluación y certificación del edificio, y uno de los aspectos a calificar es naturalmente el diseño. El proceso de diseño de una edificación involucra un proceso arquitectónico que imprima una visión artística y funcional.

En este trabajo se considera el estudio del diseño estructural de la vivienda de interés social en México. Esto es particularmente importante debido a que las decisiones que se toman en la etapa del diseño de un proyecto de edificación suelen determinar significativamente los impactos ambientales así como los costos de mantenimiento y operación, por lo que es relevante definir un diseño estructural sostenible.

Las viviendas de interés social en México tienen diferentes tipologías estructurales. Sin embargo, se puede concluir que la gran mayoría de las viviendas tienen una superficie de construcción menor a 100 m<sup>2</sup>, los materiales de construcción más usados son el tabicón y el tabique rojo, y se utiliza losa maciza de concreto reforzado. En cuanto a la estructura, lo más usual es construir con muros de carga y la forma más común es la rectangular [19].

Por esa tipología general caracterizada en la zona centro de México para la vivienda de interés social, se consideró pertinente en este trabajo enfocar el diseño estructural al estudio ambiental considerando únicamente el concreto, el acero de refuerzo y la madera para la cimbra tanto de las columnas como de las trabes o vigas.

Se evaluaron diferentes proyectos de diseño estructural basados en formas rectangulares y con edificaciones con un máximo de 5 niveles. Cada opción de diseño representa una configuración con un determinado número de columnas y trabes, y todas cumplen la normatividad vigente en la zona metropolitana de México.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo IO fue desarrollado por el economista Wassily Leontief en los años

70, pero basado en sus trabajos de los años 30. No obstante, fue hasta los 90s cuando se aplicó el modelo IO al ACV como una alternativa al ACV por procesos, surgiendo de esta manera el modelo IO-ACV [20]. Este modelo permite estimar los materiales y energía requerida por las actividades económicas involucradas en la adquisición de los suministros de productos. Por tanto, su principal limitación es que solo permite estimar impactos ambientales hasta la fabricación de un producto [21].

Los diferentes estudios realizados acerca del modelo IO-ACV y sus enfoques han permitido establecer tres variantes: análisis híbrido estratificado, análisis híbrido basado en IO y el análisis híbrido integrado. Cada uno de ellos tiene un contexto diferente de aplicabilidad en cuanto a requerimientos de información, incertidumbre de los datos, límites del sistema, intensidad de tiempo y recursos humanos, simplicidad y capacidad computacional requerida [22].

Las ventajas del IO-ACV sobre el ACV por procesos son sobresalientes en precisión si existen las condiciones para utilizar el IO-ACV: un estudio de pre-uso del producto, la cantidad de materias primas importadas debe ser poco significativa y debe existir información ambiental sectorizada [23]. El modelo IO-ACV calcula la huella de carbono a partir de datos económicos de las cadenas de suministros y el impacto ambiental se mide en CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) [24].

La propuesta de evaluación ambiental de este trabajo consiste en evaluar distintas opciones de diseño estructural combinando dos modelos de ACV: la primera con IO-ACV combinado con huella de carbono pretende discernir a manera de vistazo entre las diferentes opciones de diseño estructural. La segunda fase requiere datos de entrada más precisos sobre cantidad de material de construcción y costos de los materiales para determinar

la mejor opción de diseño. Cada opción de diseño puede representar configuraciones o dimensiones diferentes de las columnas o trabes por lo que, por ejemplo, las cantidades de concreto y acero varían de un diseño a otro.

Fase I: Evaluación ambiental amplia

- 1) *Obtención de un conjunto reducido de diseños estructurales.* La evaluación ambiental comienza a partir de un conjunto de opciones de diseño optimizadas en la cantidad de material. Así, se tiene las dimensiones idóneas del edificio, el número de trabes y columnas óptimo. Los datos que se requieren para el modelo IO-ACV son las cantidades de material óptimas en columnas y trabes y techos. Además, cada opción debe cumplir con los requerimientos legales y soportar las cargas sísmicas de acuerdo con la normativa vigente en la zona de construcción.
- 2) *Aplicación del modelo IO-ACV.* Se diseñó una tabla con factores de impacto potencial ambiental que fueron estimados a partir del método EIO-LCA. Estos factores incluyen la extracción de la materia prima hasta la fabricación de los materiales.
- 3) *Estimación de las distancias de recorrido promedio del proveedor de material al sitio de la construcción.* Este cálculo se efectuó para calcular la huella de carbono generada por el transporte de los materiales. Se utilizó una base de datos de proveedores de materiales de la zona centro de México.
- 4) *Selección del proveedor en cada uno de los tres materiales.* Esta selección se realizó mediante el cálculo de la distancia de cada proveedor a la obra y considerando que el decisor del diseño estructural se inclinaría por el principio sustentable del proveedor más cercano.

- 5) *Selección del tipo de vehículo de transporte.* Los tipos de vehículos más comunes para transportar materiales fueron: camión de 5 t para varilla, camión mezclador para el concreto y camión de 3.5 ton para la madera. Se consideró carga llena del vehículo y recorridos de ida y con vuelta sin reparto y vacíos.
- 6) *Cálculo de carga ambiental total.* Se eligió la categoría de impacto ambiental Calentamiento Global. El cálculo de la carga ambiental total se obtuvo al sumar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (t CO<sub>2</sub>e) generadas por los gases de efecto invernadero: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (metano), N<sub>2</sub>O (óxido de nitrógeno) y HFC (hidrofluorocarburos).

La carga ambiental total (CA<sub>T</sub>) de cada opción de diseño se determinó por la Ec. (1):

CA<sub>T</sub> = CA<sub>M</sub> + CA<sub>Tr</sub> (1)

Donde CA<sub>M</sub> es la cantidad de CO<sub>2</sub> generada por los materiales y CA<sub>Tr</sub> es la cantidad de CO<sub>2</sub> generada por el transporte de los materiales desde el proveedor del material hasta la ubicación proyectada de la obra.

La cantidad de CO<sub>2</sub> de cada material (CA<sub>M</sub>) se calculó con la Ec. (2):

CA<sub>M</sub> = Q<sub>M</sub> \* F<sub>act</sub> \* F<sub>i</sub> (2)

Donde: Q<sub>M</sub> es la cantidad de material estructural, F<sub>act</sub> es el factor de actualización de costo del material y F<sub>i</sub> es el factor de impacto ambiental obtenido para cada material por el método EIO-LCA.

El factor de actualización (F<sub>act</sub>) se calculó con la Ec. (3):

F<sub>act</sub> = IPC<sub>1</sub> / IPC<sub>2</sub> (3)

Donde IPC<sub>1</sub> es el índice de precios inicial (2002) y el IPC<sub>2</sub> es el índice de precios

| Flujo                                                     | Propiedades del flujo           | Unidad |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|
| tap water - RoW                                           | Mass                            | t      |
| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 - RoW   | Goods transport (mass*distance) | t*km   |
| concrete, 25MPa - RoW                                     | Volume                          | m3     |
| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 - RoW   | Goods transport (mass*distance) | t*km   |
| plywood, for outdoor use - RoW                            | Volume                          | m3     |
| concrete, 25MPa - RoW                                     | Volume                          | m3     |
| transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 - RoW | Goods transport (mass*distance) | t*km   |
| reinforcing steel - RoW                                   | Mass                            | t      |

Tabla 1: Lista de inventario del ACV por procesos para la estructura de la edificación

posterior. Estos índices fueron obtenidos del Índice de Precios de los EUA (Producer Price Indexes, PPI) hasta los años en que se disponen bases de datos [25].

Los factores de impacto ambiental potencial  $F_i$  para cada material (concreto y acero) se determinaron con la Ec. (4):

$$F_i = F_{i0} / 1,000,000 \tag{4}$$

Donde:  $F_i$  es el factor de impacto ambiental potencial para cada material por cada dólar de costo del material y  $F_{i0}$  es el factor de impacto ambiental obtenido por el método EIO-LCA. El factor  $F_{i0}$  se obtuvo mediante el software del *Green Design Institute of Carnegie Mellon University*. La Tabla 4 muestra los factores de impacto ambiental  $F_{i0}$  y el FI que fueron obtenidos con el método EIO-LCA y calculados

a partir del consumo de un millón de dólares de concreto mezclado, un millón de dólares de inversión en alambre de acero y un millón de dólares de inversión en madera para cimbra.

El cálculo de la huella de carbono generado por el transporte de los materiales ( $CA_{tr}$ ) se efectuó con la Ec. (5).

$$CA_{tr} = Q_d * 2.77/1000 \tag{5}$$

| Opción de diseño | Peso de edificio<br>ton | Columnas |            |           |        | Trabes   |            |           |          |
|------------------|-------------------------|----------|------------|-----------|--------|----------|------------|-----------|----------|
|                  |                         | Concreto |            | Acero     | Cimbra | Concreto |            | Acero     | Cimbra   |
|                  |                         | m³       | kg         | Kg        | m²     | m³       | kg         | kg        | m²       |
| 1                | 2138.83                 | 69.43    | 152,737.20 | 34,139.32 | 563.04 | 159.56   | 351,024.30 | 26,575.01 | 1,341.24 |
| 2                | 2137.16                 | 68.67    | 151,074.00 | 36,499.69 | 560.16 | 158.02   | 347,648.40 | 24,201.58 | 1,328.22 |
| 3                | 2154.21                 | 70.63    | 155,390.40 | 38,728.29 | 568.80 | 161.54   | 355,396.80 | 26,477.07 | 1,353.56 |
| 4                | 2521.74                 | 79.60    | 175,111.20 | 44,852.87 | 601.92 | 209.10   | 460,012.85 | 37,100.63 | 1,535.66 |

Tabla 1. Información sobre las cantidades de material para cada opción de diseño estructural

| Opción de diseño | Costo total de edificación (dólar) | Costo de columnas (dólar) |             |             | Costo de trabes (dólar) |             |             |
|------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------|
|                  |                                    | Concreto                  | Acero       | Cimbra      | Concreto                | Acero       | Cimbra      |
| 1                | \$ 100,872.47                      | \$ 7,561.52               | \$29,471.14 | \$ 6,418.02 | \$17,378.07             | \$22,941.18 | \$17,102.54 |
| 2                | \$ 100,412.88                      | \$ 7,479.18               | \$31,508.76 | \$ 6,385.19 | \$17,210.94             | \$20,892.28 | \$16,936.52 |
| 3                | \$ 105,319.98                      | \$ 7,692.87               | \$33,432.63 | \$ 6,483.67 | \$17,594.54             | \$22,856.62 | \$17,259.64 |
| 4                | \$ 128,632.98                      | \$ 8,669.19               | \$38,719.73 | \$ 6,861.20 | \$22,773.74             | \$32,027.53 | \$19,581.58 |

Tabla 2: Información sobre los costos de materiales para cada opción de diseño estructural

|                  | Concreto    |       | Acero de refuerzo |       | Madera de cimbra |       |
|------------------|-------------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|
| IPC <sub>1</sub> | 2002        | 2010  | 2002              | 2010  | 2002             | 2005  |
| IPC <sub>2</sub> | 152.7       | 210.8 | 106.7             | 241.8 | 172.8            | 206.2 |
| F <sub>act</sub> | 0.724383302 |       | 0.44127378        |       | 0.838021339      |       |

Tabla 3: Factores de actualización de precios para el concreto, acero de refuerzo y madera de cimbra

|                 | Factores de impacto (FI) para concreto |  | Factores de impacto (FI) para acero de refuerzo |  | Factores de impacto (FI) para madera de cimbra |  |
|-----------------|----------------------------------------|--|-------------------------------------------------|--|------------------------------------------------|--|
|                 | (por \$ 1 dólar de costo)              |  | (por \$ 1 dólar de costo)                       |  | (por \$ 1 dólar de costo)                      |  |
|                 | t CO <sub>2</sub> e                    |  | t CO <sub>2</sub> e                             |  | t CO <sub>2</sub> e                            |  |
| F <sub>i0</sub> | 2740                                   |  | 2030                                            |  | 651                                            |  |
| FI              | 0.00274                                |  | 0.00203                                         |  | 0.000651                                       |  |

Tabla 4: Factores de impacto ambiental del concreto y acero relacionados con Calentamiento Global por EIO-LCA

| Opción de diseño estructural | Número de viajes (teórico) | Número de viajes (real) | Distancia de recorrido (km) | Consumo de diesel para transporte del concreto (lt) | IE <sub>t</sub> t CO <sub>2</sub> e por el consumo de diésel |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1                            | 32.71                      | 33.00                   | 1320.00                     | 396.00                                              | 0.96                                                         |
| 2                            | 32.38                      | 32.00                   | 960.00                      | 288.00                                              | 0.94                                                         |
| 3                            | 33.17                      | 33.00                   | 792.00                      | 237.60                                              | 1.00                                                         |
| 4                            | 41.24                      | 41.00                   | 1476.00                     | 442.80                                              | 1.22                                                         |

Tabla 5: Estimación del consumo de combustible para el concreto para cuatro opciones de diseño estructural

|                              | Materiales         |       |                  |                  |       |                  | Transporte                                   | Total de Impacto Ambiental Estimado (t CO2 e) |
|------------------------------|--------------------|-------|------------------|------------------|-------|------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Opción de diseño estructural | Columnas (t CO2 e) |       |                  | Trabes (t CO2 e) |       |                  | Total por transporte de materiales (t CO2 e) |                                               |
|                              | Concreto           | Acero | Madera de cimbra | Concreto         | Acero | Madera de cimbra |                                              |                                               |
| 1                            | 200.21             | 26.4  | 3.5              | 34.49            | 20.55 | 9.33             | 0.59253181                                   | 295.0725318                                   |
| 2                            | 199.3              | 28.23 | 3.48             | 34.16            | 18.72 | 9.24             | 0.38906755                                   | 293.5190676                                   |
| 3                            | 209.04             | 29.95 | 3.54             | 34.92            | 20.47 | 9.42             | 0.38316413                                   | 307.7231641                                   |
| 4                            | 255.31             | 34.68 | 3.74             | 45.2             | 28.69 | 10.68            | 0.52838304                                   | 378.828383                                    |

Tabla 6: Resumen de impacto ambiental para cada opción de diseño por IO-ACV

| Opción de diseño | CML2001 (t CO2 e) A | TRACI (t CO2 e) B | EDIP (t CO2 e) C | Emisiones promedio (t CO2 e) (A+B+C)/3 | Desviación estándar (t CO2 e) |
|------------------|---------------------|-------------------|------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
| 1                | 238.00              | 214.86            | 234.92           | 229.26                                 | 12.56                         |
| 2                | 237.00              | 213.99            | 234.00           | 228.33                                 | 12.50                         |
| 3                | 253.00              | 228.09            | 249.58           | 243.56                                 | 13.49                         |
| 4                | 368.00              | 331.76            | 363.02           | 354.26                                 | 19.64                         |

Tabla 8: Resumen de emisiones de CO<sub>2</sub> e para cada opción de diseño estructural

Donde  $CA_{tr}$  es el impacto estimado por el transporte del material y  $Q_d$  es la cantidad de diésel utilizado en el transporte del material. Nótese que el factor 2.77 significa que por cada litro de diésel se generan 2.77 kg de CO<sub>2</sub>. [26].

Fase II: Evaluación ambiental detallada

La Fase II consiste en una evaluación ambiental detallada de cada opción de diseño y se basó en el ACV por procesos de acuerdo con la norma ISO 14040. Se efectuó un ACV por cada opción de diseño.

- a) Objetivos y alcances del estudio. La unidad funcional en el ACV de cada diseño se estableció como 1 t de estructura. Los límites del sistema se establecieron de A1-A4, es decir, desde el suministro de materia prima hasta el transporte. La regla de corte fue de 0.5 %.
- b) Análisis del inventario.

La Tabla 1 muestra los materiales (flujo) que se utilizaron para el ACV. Se utilizó OpenLCA 1.4.2 con las bases de datos del Ecoinvent 3.1.

Las cantidades en cada material se calcularon a partir de la información de cada opción de diseño (Tabla 1).

- c) Análisis de impactos. Se eligió la categoría ambiental de Calentamiento Global, a 100 años (GWP-100), para comparar con las estimaciones obtenidas mediante IO-ACV y en la misma

unidad de medición (t CO<sub>2</sub> e). Los métodos de análisis de inventario seleccionados para esta categoría fueron:

CML2001, un método europeo de punto medio; TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*) es un método de punto medio de amplio uso en los Estados Unidos y EDIP (*Environmental Design of Industrial Products*) es otro método europeo de punto medio. Los tres métodos permiten el cálculo del GWP-100.

- d) Interpretación de los resultados. Se compararon las emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas por cada uno de los métodos de análisis de inventario.

3. RESULTADOS

La propuesta de evaluación ambiental de las dos fases se aplicó a 4 opciones de diseño estructural tal como se muestra en las Tablas 1 y 2.

Fase I: Evaluación ambiental amplia

La Tabla 3 muestra los IPC obtenidos para los materiales de la estructura de la edificación según el PPI, y los factores de actualización para cada material.

La Tabla 4 presenta los factores de impacto que convierten los costos en dólares a t CO<sub>2</sub> e y la Tabla 5 es un ejemplo de los cálculos de consumo de combustible diésel necesario para estimar las emisiones en el transporte. Se consideró el ren-

dimiento del vehículo, capacidad de carga, distancia de recorrido según Google Maps y el número de viajes de ida y vuelta.

La Tabla 6 presenta las estimaciones de impacto ambiental ( $CA_{tr}$ ) para cada diseño estructural obtenidas en la Fase I.

Fase II: Evaluación ambiental detallada

La Tabla 8 presenta las estimaciones de CO<sub>2</sub> e por tres métodos en el ACV de los materiales y su transporte.

4. DISCUSIÓN

La evaluación ambiental de las cuatro opciones de diseño por IO-ACV (Tabla 6) en la categoría de Calentamiento Global genera la secuencia de la mejor opción como 2-1-3-4, siendo la opción 2 el diseño estructural con menor emisión total de CO<sub>2</sub> y en consecuencia, menor contribución en esa categoría.

Por otra parte, la evaluación ambiental de las opciones de diseño por ACV por procesos (Tabla 8) muestra que en la Categoría de Calentamiento Global se tiene la secuencia de la mejor opción como 2-1-3-4, siendo la opción 2 la de menor emisión de CO<sub>2</sub>.

En suma, las secuencias de evaluación de opciones obtenidas en ambas fases y por modelos de ACV diferentes, resultaron ser iguales. Esto se explica porque tanto el modelo IO-ACV como el ACV por procesos se basan en la cantidad de material necesaria para cada diseño.

Por otra parte, las diferencias de las estimaciones de CO<sub>2</sub> entre ambos mode-

los es de casi un tercio sobre el valor de referencia. Por ejemplo, para la opción 1 se tiene una estimación de 295.07 t CO<sub>2</sub> e mediante IO-ACV y de 229.26 t CO<sub>2</sub> e mediante ACV por procesos, una diferencia de 65.81 t CO<sub>2</sub> e lo cual representa una variación de 28.7 % con respecto al ACV por procesos. La desviación media absoluta de las emisiones de CO<sub>2</sub> en las cuatro opciones es de 54.93 t CO<sub>2</sub> e.

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó la aplicabilidad del modelo IO-ACV en la evaluación de un conjunto de opciones de diseño estructural para viviendas de interés social, formas rectangulares y que se basan en muros de carga (columnas y trabes).

El modelo IO-ACV requiere contar con bases de datos de los sectores económicos relacionados con la cadena de suministros de los materiales a analizar, en este caso, del acero de refuerzo, concreto y madera de cimbra. La falta de estas bases de datos sería un obstáculo para utilizar este modelo en contextos muy diferentes. Sin embargo, las aproximaciones pueden ser útiles según se concluye de aplicarlo en las cuatro opciones de diseño analizadas.

Las estimaciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> e con los tres métodos de análisis de inventario fueron consistentes ya que el coeficiente de variación más bajo fue de 5.4 % y el más alto de 5.5 %.

Por otra parte, al comparar las estimaciones de CO<sub>2</sub> e obtenidas por el modelo IO-ACV y el promedio de los tres métodos del ACV por procesos, se tienen diferencias significativas. La más alta se obtuvo con la opción 1 (28.7 %) y la más baja con la opción 4 (6.9 %). Sin embargo, la secuencia de evaluación que se obtuvo es la misma en ambos modelos por lo que se evidencia que ambos métodos serían equivalentes al usarse para evaluar opciones.

La integración del modelo IO-ACV, huella de carbono para el transporte y el ACV de procesos, en dos fases de evaluación permiten hacer una evaluación rápida de las opciones de diseño estructural y una evaluación detallada posterior que ofrece más precisión en las estimaciones de CO<sub>2</sub>.

Las perspectivas de este trabajo serían dirigidas a realizar más comparaciones con más casos de evaluación de opciones, revisar los resultados en otras categorías de impacto ambiental, determinar rangos de variación aceptables y ajustar las diferencias entre los modelos de ACV a través de alguna técnica matemática o computacional como una red neuronal.

## PARA SABER MÁS

- [1] PNUMA. "Informe anual de 2015". Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2016. 64 p. ISBN: 978-92-807-3518-5.
- [2] INECC. "Inventario nacional de gases de efecto invernadero". 1 edición. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 412 p. ISBN: 978-607-8246-63-2.
- [3] Recchia, L., Boncinelli, P., Cini, E., Vieri, M., Garbati, F., & Sarri, D. (2011). *Green Energy and Technology*. (J. Amouroux, Ed.). Bentham Science Publishers.
- [4] Azapagic, A. (2006). Life Cycle Assessment as an Environmental Sustainability Tool. In J. Dewulf y H. Van Langenhove, Eds. *Chichester, Renewables-Based Technology*. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd.
- [5] International Standard Organization. ISO 14040:2006.
- [6] Mearing T, Nattan, C, Morgan M. "Life cycle cost analysis handbook". State of Alaska. Department of Education & Early Development: 1 edition. 1999.
- [7] International Standard Organization. ISO 15686-5, Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing.
- [8] Kishk M, Al-Hajj A, et. al. "Whole life costing in construction: a state of the art review". RICS Research Paper Series. 2003. Vol 4-18. 67 p. Available from: <http://openair.rgu.ac.uk>
- [9] Flanagan R, Kendell A, Norman G. y Robinson, G D. "Life cycle costing and risk management". *Construction Management and Economics*. 1987. Vol. 5-4. p. 53- 71. DOI:<http://dx.doi.org/10.1080/01446193.1987.10462093>.
- [10] Alqahtani, A. y Whyte, A. "Clarification of the Essential of Life Cycle Cost upon Decision-Making Process: An Empirical Study in Building Projects". *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 2014. Vol 8-12.
- [11] Golzarpoor H, González V, Poshdar M. "Improving construction environmental metrics through integration of Discrete Event Simulation and Life Cycle Analysis". *International Association for Automation Proceedings of the 30th ISARC*. 2013. p.130-139.
- [12] Buyle M, Braet J, Audenaert. "Review on LCA in the construction industry: Case Studies". *Mathematical Modelling and Simulation in Applied Science*. 2012. ISBN: 978-1-61804-086-2.
- [13] Hendrickson CH, Horvath A. "Economic Input-Output Models for Environmental Life-Cycle Assessment". *Carnegie Mellon University*. April 1998. Vol. 32-7. p. 184 A-191 A.
- [14] Hendrickson CH, Horvath A, et al. "Comparing two life cycle assessment approaches: A process model vs. Economic Input-Output-Based Assessment". *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 1997. ISBN: 0-7803-3808-1/97
- [15] Dietzenbacher E, Los B, Stehrer R, et al. "The construction of World Input-Output Tables in the WIOD Project". *Economic System Research*. September 2013. Vol. 25-1. p. 71-98. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09535314.2012.761180>
- [16] Zhang Y, Gibbemeyer E L y Bakshi BR. "Empirical Comparison of Input-Output Methods for Life Cycle Assessment". *Journal of Industrial Ecology*. May 2014. Vol. 18-5. p. 734-746. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12133>
- [17] Guereca LP, Sosa RO, Gilbert HE, et. Al. "Life cycle assessment in Mexico: overview of development and implementation". *International Journal of Life Cycle Assessment*. March 2015. Vol. 20-3, p. 311-317. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-014-0844-9>
- [18] Florian F, Velasco P. "Estrategia Nacional para la Vivienda Sustentable". Fundación IDEA A.C. 2013. ISBN: 978-607-95249-3-7.
- [19] Valdés, E. "Análisis de Ciclo de Vida y aspectos medioambientales en el diseño estructural". *Universidad Autónoma del Estado de México, INFONAVIT. Redalyc* 2011. ISBN: 978-607-95640-3-9
- [20] Bilec MM, Ries RJ, Matthews S, et. al. Life-Cycle Assessment Modeling of Construction Process for Buildings. *Journal of Infrastructure Systems*. September 2010. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000022](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000022)
- [21] Sharrard A, Matthews H.S, et al. "Estimating construction project environmental effects using and input-output hybrid life cycle assessment model". *Journal of Infrastructure Systems*. December 2008. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2008\)14:4\(327\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2008)14:4(327))
- [22] Gemechu E, Butnar I, et al. "Comparison of life cycle inventory (LCI) methods for carbon footprint calculation: the case of pulp and paper sector in Spain". *Universitat Rovira I Virgili*. España.
- [23] Suh S, Huppes G. "Methods for Life Cycle Inventory of a product". *Journal of Cleaner Production*. 2005. Vol. 13, p. 687-697. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.04.001>
- [24] Bouchery Y, Corbett C, Fransoo JC, Tarkan T. "Sustainable Supply Chains". Springer. 2016. ISBN 978-3-319-29789.
- [25] United States Department of Labor. *Producer Price Indexes*. Bureau of Labor Statistics. 2016.
- [26] United States Environmental Protection Agency. EPA. Mayo 2016.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el apoyo brindado para la realización de esta investigación, a la empresa Kaltia por su colaboración y facilitar datos de diversos proyectos de construcción, así como el apoyo a las Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Universidad Autónoma de San Luis Potosí y la Universidad de Yucatán, por sus valiosas aportaciones.