

## Evaluación de la sustentabilidad de diferentes técnicas de producción de concreto hidráulico basado en su control de calidad

L. M. Reynosa Morales<sup>\*1</sup>, F. J. Olgún Coca<sup>2</sup>, H. A. Guillén Trujillo<sup>1</sup>, F. A. Alonso Farrera<sup>1</sup>, P. Castro Borges<sup>3</sup>, A. López González<sup>1</sup>, G. Ramos Torres<sup>4</sup>

\*Autor de Contacto: [lmreynosa@hotmail.com](mailto:lmreynosa@hotmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.175>

Recepción: 18-10-2016 | Aceptación: 10-01-2017 | Publicación: 30-01-2017

### RESUMEN

En este trabajo, se aplicó un método de valoración ambiental en la producción de concreto con el fin de evaluar su dependencia de los recursos naturales no renovables. Tres técnicas de producción basadas en su control de calidad: industrializada, semi-industrializada y manual; se evaluaron mediante eMergía. Esto se realizó para medir la cantidad de uso de los recursos del medio ambiente en términos de energía solar equivalente. Las Transformidades resultantes se compararon con el fin de poner de manifiesto que el análisis de eMergía es sensible al contexto local y los límites del sistema de referencia. Los resultados obtenidos muestran una alta dependencia en la producción de concreto sobre las fuentes de recursos externos, siendo el concreto semi-industrializado el más sustentable.

**Palabras clave:** análisis eMergético; contabilidad ambiental; sustentabilidad; transformidad; concreto.

**Citar como:** L. M. Reynosa Morales, F. J. Olgún Coca, H. A. Guillén Trujillo, F. A. Alonso Farrera, P. Castro Borges, A. López González, G. Ramos Torres (2017). “Evaluación bajo control de calidad de la sustentabilidad de diferentes técnicas de producción de concreto hidráulico”, Revista ALCONPAT, 7 (1), pp. 87-103, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.175>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>3</sup> Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Mérida, Yucatán, México.

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

## Sustainability evaluation of different techniques for concrete mixing based on quality control

### ABSTRACT

In this study energy analysis, an environmental valuation method was applied to concrete mixing with the purpose of evaluating its dependence on non-renewable natural resources. Three concrete mixing techniques, industrialized, semi-industrialized and manual, were evaluated based on quality control. The quantity of environmental resources used in production was measured in terms of equivalent solar energy. The resulting transformities were compared to show that energy analysis is sensible to local context and the limits of the reference system. The results obtained show that concrete mixing is highly dependent on external resources. Semi-industrialized concrete was found to be the most sustainable.

**Keywords:** energy analysis; environmental accounting; sustainability; transformity; concrete.

## Avaliação da sustentabilidade de tres métodos de produção de concreto com base no controle de qualidade

### RESUMO

Este trabalho apresenta um método de avaliação ambiental na produção de concreto, baseado no consumo de recursos naturais não-renováveis. Três técnicas de produção (industrializada, semi-industrializada e manual) foram avaliadas sob o controle de qualidade eMergia. Este conceito foi utilizado para medir a quantidade do uso de recursos do meio ambiente em termos de energia solar equivalente. Os resultados foram comparados a fim de mostrar que a análise eMergia é sensível ao contexto local e aos limites do sistema de referência. Os resultados mostram uma alta dependência da produção de concreto em relação às fontes de recursos externos, sendo o concreto semi-industrializado o mais sustentável, segundo esta análise.

**Palavras chave:** análise eMergética; contabilidade ambiental; sustentabilidade; transformidade; concreto.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el desarrollo económico ha generado consecuencias negativas de tipo ambiental, por lo que existe la necesidad de generar herramientas de gestión con el objeto de minimizar los impactos ambientales (Berardi, 2012; Vega et al., 2013). En el sector de la construcción como a nivel industrial, la integración de criterios medioambientales en el diseño y fabricación de productos puede conseguir una importante reducción de los impactos que podrían tener esos productos a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas para su fabricación, hasta su disposición final (Ruiz de Arbulo, et al., 2016).

En la literatura existen numerosos estudios que analizan los resultados de distintas metodologías orientadas a mejorar la sostenibilidad en el sector de la construcción, como la metodología verde, los modelos energéticos, las declaraciones medioambientales de producto basadas en Análisis del Ciclo de Vida (LCA), o la valoración ambiental entre otras (Hamza y Horne, 2007). En lo que se refiere a la aplicación de análisis eMergéticos existen numerosas publicaciones que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Diferentes aplicaciones del método de análisis eMergético

Autor/Año	Aplicación
C. Ferreira, S. Hurtado/2010; F. Suca, A. Suca y J. Siche/2014; N. Aguilar, J. Alejandro y R. Espinoza/2015	Estudios agroforestales
E. Ortega, C. Vallim y P. Del Pozo/2014	Evaluación de sistemas productivos
I. López y J. Rodríguez/2013	Análisis a nivel municipal de sostenibilidad ambiental
H. Mu, X. Feng y K. H. Chu/2012	Cálculo de los flujos de energía en sistemas de producción de sustancias químicas complejas
X. Wu, F. Wu, X. Tong/2015	Análisis de reciclaje ecológico de desechos
S. Bastioni, F. Morandi/2011	Energía y algebra de la eMergía
T. Abel/2015; F. Morandi, D. Campbell/2015; C. Wrigth y H. Ostergard/2015; L. Zarba y M. Brown/2015	Modelación y análisis de sistemas
F. Agostinho, A. Bertaglia/2015; E. Campbell/2015	Análisis eMergético de tecnologías de energías
B. Lacarriere, K. Deutz, N. Jamali y =. Le Corre/2015	Análisis eMergético de los desechos y su reciclaje
I. Li, H. Lu, D. Tilley y G. Qiu/2014; D. R. Tilley/2015; C. Vilbiss y M. Brown/2015; S. E. Tennenbaum 2015	Métodos de contabilidad eMergética

La producción de grandes volúmenes de concreto se emplea generalmente para la construcción de edificios, particularmente, para la construcción de cimentaciones, marcos estructurales, pisos, losas, y elementos prefabricados (Pulselli et al., 2007). El cemento es el componente principal del concreto que, a su vez, después del agua, es el material de mayor consumo del mundo. Por lo tanto, los impactos ambientales del cemento siempre están asociados a los del concreto.

La producción mundial de cemento ha ido aumentando constantemente desde principios de 1950, especialmente en los países en desarrollo, según datos de la Revista Internacional del Cemento (ICR) en el año 2012 se produjeron alrededor de 3,939 millones de toneladas, con un crecimiento anual de alrededor del 8 al 9%; duplicándose en menos de 20 años. Asia ha sido la fuerza impulsora con China e India siendo actualmente los principales productores, seguidos por Estados Unidos.

En el año 2012 se estimó que la producción de cemento en América Latina y el Caribe haya alcanzado los 180 millones de toneladas. Manteniendo el liderazgo Brasil en la producción de cemento seguido de México, Colombia y Argentina. En 2012 el consumo per cápita estimado para América Latina y el Caribe es de 301 kg/hab; y para México 305 kg/hab. Según las cifras del informe de la ICR Research, la producción de cemento de América Latina y el Caribe equivale al 4.7% de la producción mundial (estimación 2012). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015) la producción en México para el año 2012 fue de 41, 608,413 toneladas.

La industria del cemento libera aproximadamente el 5% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>. El impacto ambiental debido a la emisión de contaminantes, partículas, cenizas y dióxido de carbono ha sido investigado en gran medida en los últimos años (Kjellsen et al., 2005; Pade y Guimaraes, 2007), así como el ciclo de vida del cemento y concreto (Vold y Ronning, 1995; Nisbet y Van Geem, 1997), (Josa et al., 2004; Josa et al., 2007; Nazar, 2013) y la huella ecológica del concreto (Bastianoni et al., 2007).

La Asociación Mexicana de Concreteros Independientes (AMCI) estimó para el año 2015 un crecimiento del ocho por ciento del sector, el doble que en 2013, impulsado por grandes proyectos de infraestructura federal y de vivienda en el país. La producción de concreto en México se ubica actualmente en 32 millones de metros cúbicos anuales, pero el potencial con la capacidad instalada podría llegar hasta los 50 millones de metros cúbicos al año.

En razón de lo anterior, este estudio se relaciona con el uso intensivo de los recursos minerales no renovables y los combustibles fósiles en la extracción de los agregados inertes (arena y grava triturada), la utilización de agua, la fabricación de cemento para la producción del concreto y, en particular, como objetivo evaluar la cantidad de entradas de recursos ambientales en el proceso de producción. Se evaluó el proceso de producción de concreto como caso de estudio, teniendo en cuenta los procesos estándares para la producción de Cemento Portland Compuesto 30R. En comparación con los datos obtenidos y el cálculo de los valores calculados anteriormente (Brown y McClanahan, 1992; Buranakarn, 1998; Björklund et al., 2001; Brown y Buranakarn, 2003; Pulselli et al., 2008) se pone de manifiesto que el carácter del análisis eMergético es particularmente sensible a los límites de contexto y los sistemas de referencia. Debido al agudo impacto ambiental, en cuanto a la explotación de los recursos del medio ambiente y a la utilización de concreto en el desarrollo de infraestructura física, se implementó un método de contabilidad ambiental en la producción de concreto con el fin de proporcionar una evaluación más profunda de comparación sobre la sustentabilidad de las alternativas planteadas.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Localización de la zona de estudio

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez, capital y núcleo urbano más grande del estado de Chiapas, México. Es sede de los poderes públicos del estado y centro de la Zona Metropolitana. Su crecimiento urbano y desarrollo económico se han acelerado desde el arribo de capital nacional y extranjero que atrajo inversiones a la ciudad y el aumento de ayudas económicas al desarrollo estatal.

Según el informe Doing por el Banco Mundial (BM) y la Corporación Financiera Internacional (CFI), que clasifica a las economías por su facilidad para hacer negocios, la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, ocupa el 5° lugar en México. La capital de Chiapas se encuentra dentro del grupo de ciudades de mayor dinamismo en la región sur sureste, por su oferta de empleo, bienes y servicios, entre otros.

### 2.2 Análisis eMergéticos

El procedimiento de análisis eMergético está diseñado para evaluar los flujos de energía y materiales de los sistemas en unidades comunes (emjoules solares, abreviado como seJ) que permitan al analista comparar aspectos ambientales y financieros de los sistemas. Sobre la base de esta unidad, eMergía se define como la cantidad de energía solar utilizada, directamente o indirectamente para producir un producto o servicio (Odum, 1971, 1983, 1988, 1996) (Brown et al., 2004). En otras palabras, eMergía es la "memoria energética", que se ha utilizado a lo largo de una secuencia de diferentes procesos para obtener un producto o servicio. La Transformidad solar

es la eMergía solar requerida para generar un Joule de un servicio o un producto. Sus unidades son solar-emjoule/joule (seJ/J).

El primer paso es construir diagramas de los sistemas de flujo de energía para organizar la manera de pensar del analista y conocer las relaciones entre los componentes y los flujos de recursos. El segundo paso consiste en la construcción de las tablas de análisis de eMergía basada en los diagramas del paso anterior. Como tercer paso, se calculan los diferentes índices de eMergía que relacionan los flujos de eMergía de la economía con aquellos del medio ambiente, y finalmente, la interpretación de los índices que permiten diagnosticar la viabilidad económica y capacidad de carga de los sistemas en estudio.

Los índices eMergéticos desarrollados por Odum (1971) definen la sustentabilidad respecto a la cantidad y calidad de energía transformada por un sistema de producción particular. Su análisis utiliza el diagrama que facilita el cálculo de los índices como se presenta en la Figura 1.

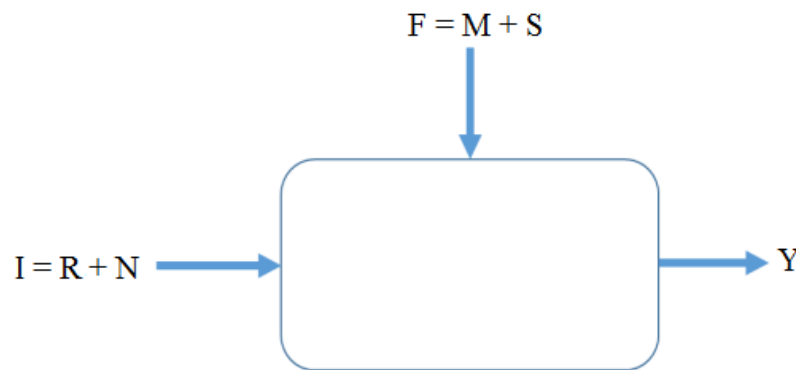


Figura 1. Diagrama de tres brazos (Odum, 1971).

Dónde:

I: Recursos Naturales Renovables (R) sumando los Recursos Naturales No Renovables (N)

F: Materiales (M) más servicios (S)

Y: Salidas del sistema

Teniendo en cuenta una región, el uso de los recursos no renovables por la industria de la construcción se evaluó a través de la eMergía. Este procedimiento siguió un acercamiento de "arriba hacia abajo" comenzando con un análisis de eMergía del país (México), luego del estado de Chiapas, el municipio de Tuxtla Gutiérrez, y finalmente a nivel alternativas.

La información fue presentada en tablas de análisis eMergéticos por alternativas y en su conjunto. Los objetivos planteados para el estudio fueron:

1. Proveer una metodología que evalúe beneficios y costos en la producción de concreto hidráulico.
2. Comparar diferentes técnicas de producción de concreto, usando indicadores eMergéticos tales como Inversión eMergética (EIR), eficiencia eMergética (EYR), Carga Ambiental (ELR), Sustentabilidad Ambiental (ESI) y Transformidades.

De acuerdo a la recopilación de información en la zona de estudio y del estado de conocimiento actual, se identificaron las técnicas empleadas para la elaboración de concreto hidráulico, además la industria de la construcción local refirió al concreto  $f'c = 24.53$  MPa como el más utilizado en el medio.

Para el estudio de las alternativas relacionadas a la producción de concreto bajo control de calidad, se eligieron tres técnicas: 1) industrializada, 2) semi-industrializado y 3) con medios manuales, y se evaluaron mediante el análisis eMergético. La comparación se hizo por medio de los índices eMergéticos obtenidos en un estudio de caso en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez,



Chiapas, México, para determinar la viabilidad de estas alternativas con respecto al componente ambiental. La unidad de evaluación fue el metro cúbico.

Las consideraciones para cada técnica fueron las siguientes:

1. Técnica industrializada. Esta técnica se puede distinguir de las dos siguientes por el uso de las máquinas a gran escala, como son la planta de concreto, camión revolovedor y cargador frontal, con ocho trabajadores para realizar el proceso de producción.
2. Técnica semi-industrializada. La técnica se caracteriza porque vincula el empleo de la mano de obra con una máquina simple (revolovedora de trompo), utiliza un grupo de diez trabajadores. Con ayuda de la revolovedora operada con gasolina, esta técnica es empleada para la generación de volúmenes moderados (no más de 45 m<sup>3</sup> por cuadrilla).
3. Técnica con medios manuales. Esta técnica utiliza una cuadrilla de quince trabajadores que tienen habilidades moderadas en el trabajo, con dos técnicos, uno de ellos como controlador de especificaciones y el otro usa su experiencia para dirigir la cuadrilla. Con ayuda de herramientas simples para su fabricación sin necesidad de combustibles, energía eléctrica o energía mecánica, ordinariamente empleado para la generación de volúmenes pequeños (no más de 10 m<sup>3</sup> por cuadrilla).

Para este estudio, las Transformidades de los agregados inertes (grava y arena), cemento y agua fueron calculadas para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Se realizó una evaluación de un proceso específico teniendo en cuenta la producción de 70,000 m<sup>3</sup> anuales para el concreto industrializado, para el semi-industrializado y con medios manuales, se consideró la producción por día de 45 m<sup>3</sup> y 10 m<sup>3</sup> respectivamente. La planta cementera para obtener la Transformidad del cemento presentó una producción anual de 2, 190,000 toneladas. La Transformidad empleada para la arena corresponde a la extracción de arena del río Santo Domingo ubicado en el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas a una distancia de 30 kilómetros de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La grava triturada explotada y extraída de la cantera ubicada en la colonia Plan Chiapas en el municipio de Chiapa de Corzo, en los límites con el municipio de Tuxtla Gutiérrez.

Los índices de eMergía empleados en este estudio fueron: el EIR, que se calculó como la relación entre la contribución de la economía (F) y la naturaleza (I), siendo adimensional. El EYR, se consideró como la relación entre la eMergía total que entra al sistema (Y) y la contribución de la economía (F). Este índice es adimensional y permite conocer, de manera general, el beneficio neto que el sistema ofrece a la economía global; el ELR se calculó como la relación entre la suma de los recursos no renovables de la naturaleza (N) y los de la economía (F) por los recursos renovables de la naturaleza (R) que también es adimensional; y el ESI indica la contribución del medio natural, es decir el trabajo energético que realizan los ecosistemas para la generación de procesos sobre la carga ambiental, que se calculó dividiendo la contribución de la naturaleza (EYR) sobre la carga ambiental (ELR).

Finalmente, los valores calculados de eMergía del concreto en este estudio se compararon con evaluaciones anteriores de eMergía con el fin de poner de manifiesto cómo el análisis de eMergía es sensible al contexto local y los límites del sistema de referencia.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio permitió realizar comparaciones entre las técnicas de producción de concreto planteadas, usando indicadores eMergéticos tales como el EIR, el EYR, el ELR y el ESI. Los atributos eMergéticos de los sistemas fueron cuantificados y usados como indicadores de las características de cada alternativa. Para la evaluación de las alternativas se consideró un concreto de  $f'c = 24.53$  MPa cuyas proporciones se obtuvieron en el Laboratorio de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas para los casos de



Tabla 2. Análisis eMergético de la producción de concreto industrializado

No.	Descripción	Unidades (unid/m <sup>3</sup> )	Transformidad (seJ/unid)	eMergía (seJ/m <sup>3</sup> )	Referencias
<b>MATERIALES</b>					
1	Cemento	4.00E+05 g	3.61E+09	1.44E+15	*
2	Arena de río	1.07E+06 g	3.29E+09	3.53E+15	*
3	Grava triturada T.M.A. 3/4"	1.42E+06 g	2.24E+09	3.19E+15	*
4	Agua	2.51E+05 g	3.27E+06	8.19E+11	*
5	Diesel	1.08E+08 J	6.60E+04	7.13E+12	Doherty et al, 1994
6	Lubricantes	3.21E+05 J	6.60E+04	2.12E+10	Doherty et al, 1994
7	Energía eléctrica	2.76E+08 J	2.77E+05	7.63E+13	Odum, 1996
<b>PLANTA Y MAQUINARIA</b>					
8	Dosificadora de concreto	1.86E+02 g	6.70E+09	1.25E+12	Doherty et al, 1994
9	Silo de cemento	8.06E+01 g	6.70E+09	5.40E+11	Doherty et al, 1994
10	Tolva de agregados	5.58E+01 g	6.70E+09	3.74E+11	Doherty et al, 1994
11	Transportador de banda	3.10E+01 g	6.70E+09	2.08E+11	Doherty et al, 1994
12	Báscula de cemento	2.23E+01 g	6.70E+09	1.50E+11	Doherty et al, 1994
13	Báscula de agregados	3.47E+01 g	6.70E+09	2.33E+11	Doherty et al, 1994
14	Dosificador de agua	2.48E+01 g	6.70E+09	1.66E+11	Doherty et al, 1994
15	Cargador frontal	4.30E+02 g	6.70E+09	2.88E+12	Doherty et al, 1994
16	Camión revolvedora	1.14E+02 g	6.70E+09	7.64E+11	Doherty et al, 1994
17	Camión volteo	5.95E+01 g	6.70E+09	3.99E+11	Doherty et al, 1994
<b>SERVICIOS</b>					
18	Mano de obra	4.19E+06 J	4.77E+06	2.00E+13	Guillén, 1998
19	Mantenimiento y seguros	9.46E-01 \$	4.59E+13	4.34E+13	*

\*Transformidad calculada para este estudio.

$$Y = 8.32E+15$$



Tabla 3. Análisis eMergético de la producción de concreto semi-industrializado

No.	Descripción	Unidades (unid/m³)	Transformidad (seJ/unid)	eMergía (seJ/m³)	Referencias
<b>MATERIALES</b>					
1	Cemento	4.02E+05 g	3.61E+09	1.45E+15	*
2	Arena	7.25E+05 g	3.29E+09	2.38E+15	*
3	Grava triturada T.M.A. 3/4"	9.04E+05 g	2.24E+09	2.02E+15	*
4	Agua	2.33E+05 g	3.27E+06	7.60E+11	*
5	Gasolina	1.92E+07 J	6.60E+04	1.27E+12	Doherty et al, 1994
6	Lubricantes	3.33E+04 J	6.60E+04	2.20E+09	Doherty et al, 1994
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>					
7	Cabo de pala de madera	3.82E+03 g	6.79E+08	2.59E+12	Odum, 1996
8	Cuchara de pala y mango	8.77E-01 g	3.16E+09	2.77E+09	Bargigli et al, 2003
9	Botes de plástico capacidad 19 litros	1.73E+00 g	8.57E+04	1.48E+05	Brown et al, 2003
10	Revolvedora capacidad 2 sacos	7.42E+00 g	6.70E+09	4.97E+10	Doherty et al, 1994
<b>SERVICIOS</b>					
11	Mano de obra	9.30E+05 J	4.77E+06	4.44E+12	Guillén, 1998
12	Mantenimiento y seguros	6.36E-05 \$	4.59E+13	2.92E+09	*

\*Transformidad calculada para este estudio.

$$Y = 5.87E+15$$

Tabla 4. Análisis eMergético de la producción de concreto con medios manuales

No.	Descripción	Unidades (unid/m³)	Transformidad (seJ/unid)	eMergía (seJ/m³)	Referencias
<b>MATERIALES</b>					
1	Cemento	4.02E+05 g	3.61E+09	1.45E+15	*
2	Arena	7.25E+05 g	3.29E+09	2.38E+15	*
3	Grava triturada T.M.A. 3/4"	9.04E+05 g	2.24E+09	2.02E+15	*
4	Agua	2.33E+05 g	3.27E+06	7.60E+11	*
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>					
5	Cabo de pala de madera	1.29E+05 g	6.79E+08	8.76E+13	Odum, 1996
6	Cuchara y mango metálico de pala	2.96E+01 g	3.16E+09	9.35E+10	Bargigli et al, 2003

7	Botes de plástico capacidad 19 litros	1.17E+01 g	8.57E+04	1.00E+06	Brown et al, 2003
<b>SERVICIOS</b>					
8	Mano de obra	6.28E+06 J	4.77E+06	3.00E+13	Guillén, 1998

\*Transformidad calculada para este estudio.

$$Y = 5.98E+15$$

El alto valor de EIR en la producción del concreto industrializado comparado con el semi-industrializado y el fabricado con medios manuales: 10,161, 7,724 y 7,867, respectivamente; sugirió una débil capacidad competitiva debido a una alta sensibilidad a las inestabilidades de fuentes externas. En la Figura 3 se puede apreciar la comparación del EIR en la producción de concreto.

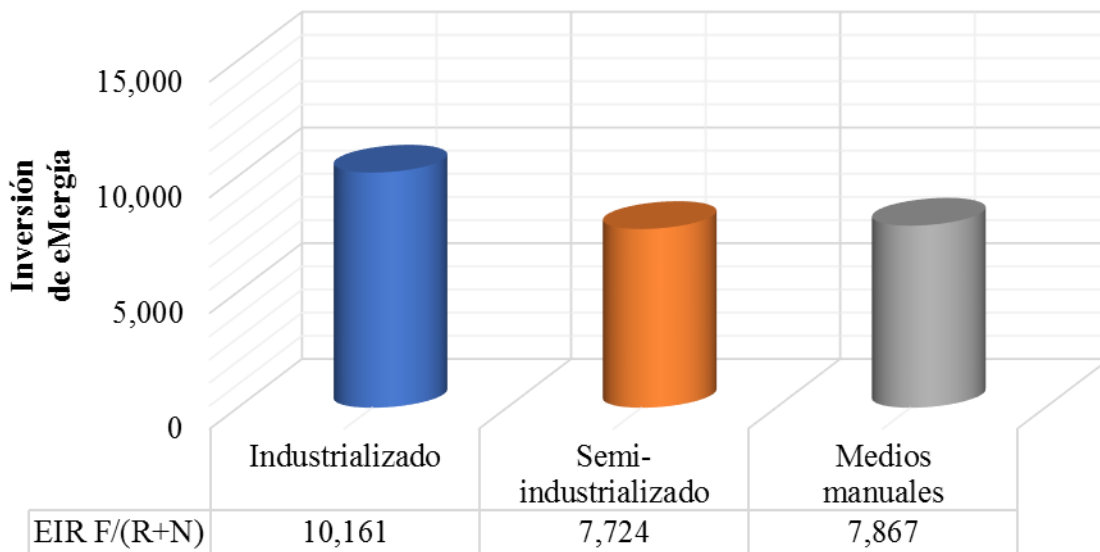


Figura 3. Inversión eMergética en la producción de concreto.

Para el caso del EYR se expresa la contribución de la naturaleza al sistema productivo, es decir, se cuantifica el trabajo del ecosistema para la obtención de procesos. Las alternativas analizadas presentaron un valor de 1.00 para los tres casos, ello pone de manifiesto el impacto del uso de materiales de cantera los cuales representan un alto porcentaje de la eMergía total (más del 98%). Ello indica que la eMergía liberada por los sistemas es igual a aquella invertida con recursos de la economía, en otras palabras, implica que son altamente dependientes de los insumos y servicios importados. Un valor EYR mucho mayor a 1 indica que el sistema analizado genera más nuevos recursos (de eMergía) que los que estaban disponibles como entradas, de lo contrario, el sistema es un consumidor transformador de recursos (Ascione et al., 2009). En la Figura 4 se ilustra gráficamente la producción de eMergía en la fabricación de concreto.

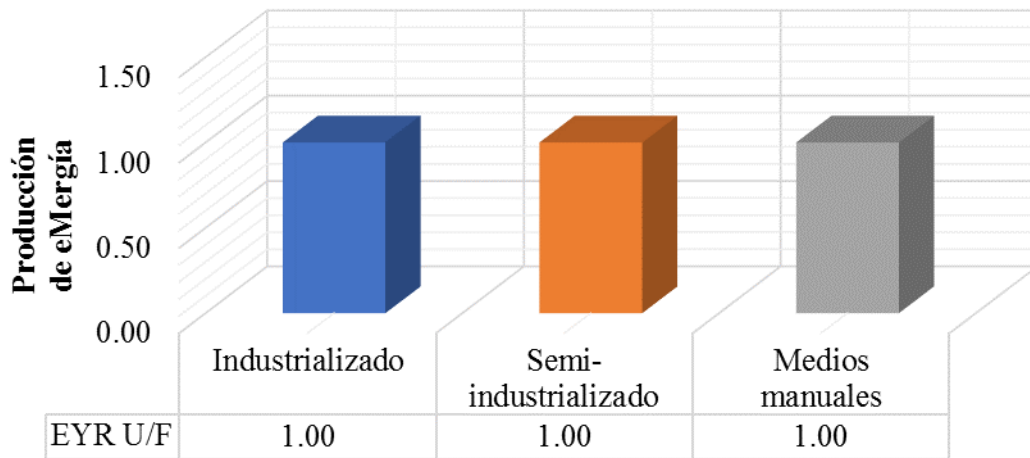


Figura 4. Producción de eMergía en la fabricación de concreto.

El análisis señala que el concreto industrializado presentó un mayor ELR con un valor de 10,161 comparado con los datos obtenidos para el semi-industrializado y con medios manuales 7,724 y 7,867, respectivamente. Estos valores son relevantes para demostrar en qué medida la producción de concreto atenta contra el medio ambiente. Es importante señalar que el concreto elaborado con medios manuales presenta mayor carga ambiental que el semi-industrializado, esto es debido a la baja productividad 10 m<sup>3</sup> en una jornada de 8 horas de trabajo contra 45 m<sup>3</sup> para el semi-industrializado. Es decir, esto refleja la energía incorporada al sistema por la mano de obra empleada en ambas técnicas. La comparación de Carga Ambiental ejercida por las alternativas planteadas es presentada en la Figura 5.

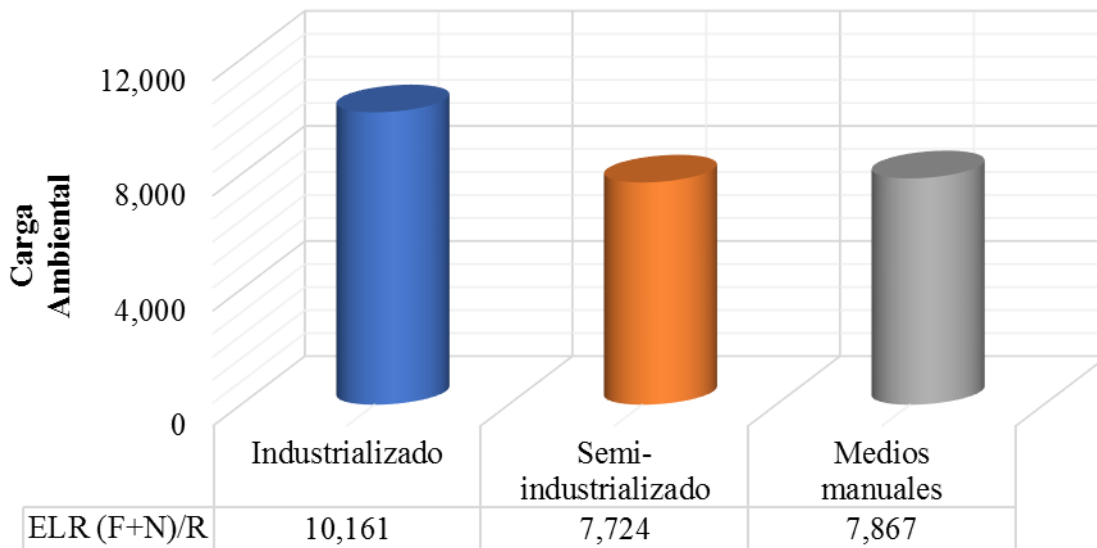


Figura 5. Carga ambiental ejercida sobre el ecosistema en la fabricación de concreto.

En el ESI se indica la contribución del medio natural, es decir el trabajo energético que realizan los ecosistemas para la generación de procesos sobre la carga ambiental. Según Brown y Ulgiati (2004), valores de ESI inferiores a 1 indican sistemas que consumen recursos y están asociados a economías altamente desarrolladas y orientadas para el consumo. Los valores reportados en este estudio indican que el concreto semi-industrializado (0.000129) es mayor que el fabricado con medios manuales (0.000127) y el industrializado (0.0000984) siendo el sistema de semi-

industrializado el que afecta en menor grado el equilibrio del medio ambiente, por lo tanto, es más sustentable ambientalmente que el concreto industrializado y el elaborado con medios manuales. En la Figura 6 puede observarse la comparación gráfica de los resultados obtenidos para cada alternativa referente al ESI. Con relación a este indicador, resalta el hecho de que la mano de obra empleada hace la diferencia entre las técnicas semi-industrializada ( $4.44E+12$ ) y con medios manuales ( $3.00E+13$ ), en función de su productividad.

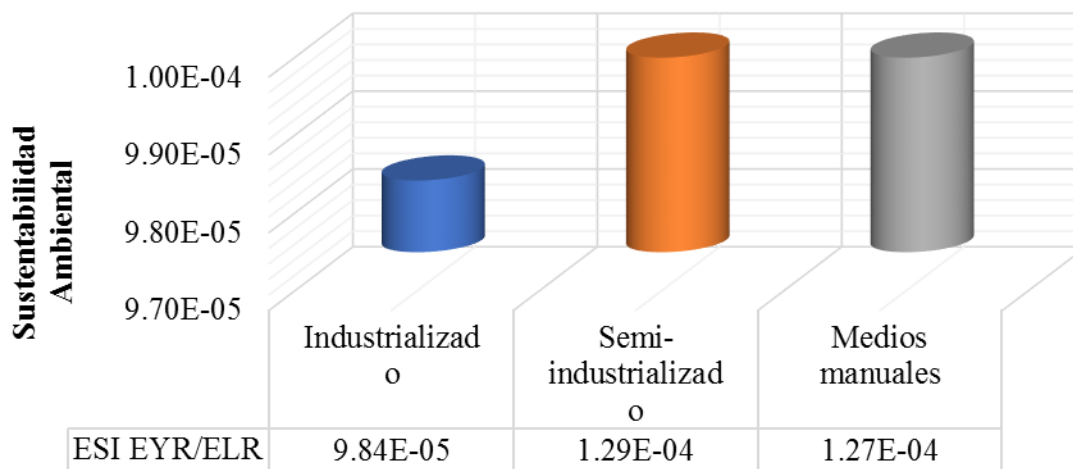


Figura 6. Sustentabilidad ambiental en la producción de concreto.

Con relación a otros estudios realizados que corresponden a la producción de concreto industrializado, se encontraron las siguientes diferencias significativas que a continuación se describen:

En Björklund et al (2001); los autores utilizaron valores de Transformidad solar para un contexto nacional. Por ejemplo, la Transformidad de la electricidad es muy específica, ya que se evaluó de acuerdo con los procesos de producción en Suecia, que incluye la nuclear (33% -aquí se representó con la Transformidad de la producción eléctrica media mundial) y la energía hidroeléctrica (66%). En este estudio, la evaluación eMergética de la producción de cemento no toma en cuenta todo el proceso de producción y esto representa una aproximación relevante. De los insumos principales, solo considera el uso de piedra caliza, la electricidad y el petróleo se tuvieron en cuenta, mientras que las entradas para el transporte, embalaje, servicios, tales como mano de obra, la maquinaria y el combustible no se evaluaron. La electricidad y la mano de obra se evaluaron a través de una relación de eMergía/dinero.

En Buranakarn (1998); la eMergía específica se evaluó en los EE.UU. En su análisis presentó una evaluación de carreteras, vehículos e infraestructuras usados, teniendo en cuenta todo el sistema nacional de transporte. El autor calculó la longitud total de las carreteras nacionales y su proceso de producción (materiales, energía, mano de obra, y otros servicios), teniendo en cuenta el costo anual de su construcción. Este valor (en seJ/km) se dividió por el porcentaje de camiones con relación al peso total de vehículos (automóviles, autobuses, camiones, otros). Lo mismo para los ferrocarriles y servicios por mar (barcos). En general, no se considera la vida útil de las carreteras, infraestructuras y vehículos. La mano de obra y otros servicios fueron evaluados a través de una relación de eMergía/dinero.

En el caso de Brown y Buranakarn (2003); la evaluación se basa principalmente en Buranakarn de 1998, además tomó en cuenta de las etapas del uso de materiales, demolición y reutilización. Por lo tanto, este análisis tuvo que ver con otras aportaciones al proceso que necesita procedimientos específicos. El presente trabajo, por el contrario, tiene la finalidad de determinar la Transformidad del concreto, desde el origen hasta su proceso de producción, que se utilizará en

la construcción de edificios y sin explorar la totalidad de su ciclo de vida hasta su destino de desecho.

Adicionalmente, Brown y McClanahan (1992); evaluaron la eMergía específica en Tailandia, con referencia a las fuentes de energía disponibles a nivel local. Este análisis se llevó a cabo en 1992, utilizando datos de 1983. El análisis de eMergía fue muy simplificado con respecto al presente estudio, ya que los autores consideran algunos problemas como el flujo de materiales, el petróleo y la electricidad como el flujo de energía y otros bienes y servicios, este último evaluado en términos del flujo de dinero (a través de una relación de eMergía/dinero).

Por su parte, Pulselli et al. (2008); se centra en los procesos de producción de la industria italiana de cemento y concreto. La mayoría de los valores de las Transformidades se evaluaron en los EE.UU. Los autores realizaron una evaluación de un proceso específico teniendo en cuenta la producción de una determinada cantidad de concreto de 23 toneladas, y su transporte al lugar de la obra. En la elección del sistema consideran algunos factores insignificantes, tales como la evaluación de la totalidad de las infraestructuras nacionales de transporte (carreteras y otros servicios). En la Figura 7 se ilustran las Transformidades del concreto, que han realizado los autores antes citados que son comparadas con los resultados obtenidos en este trabajo.

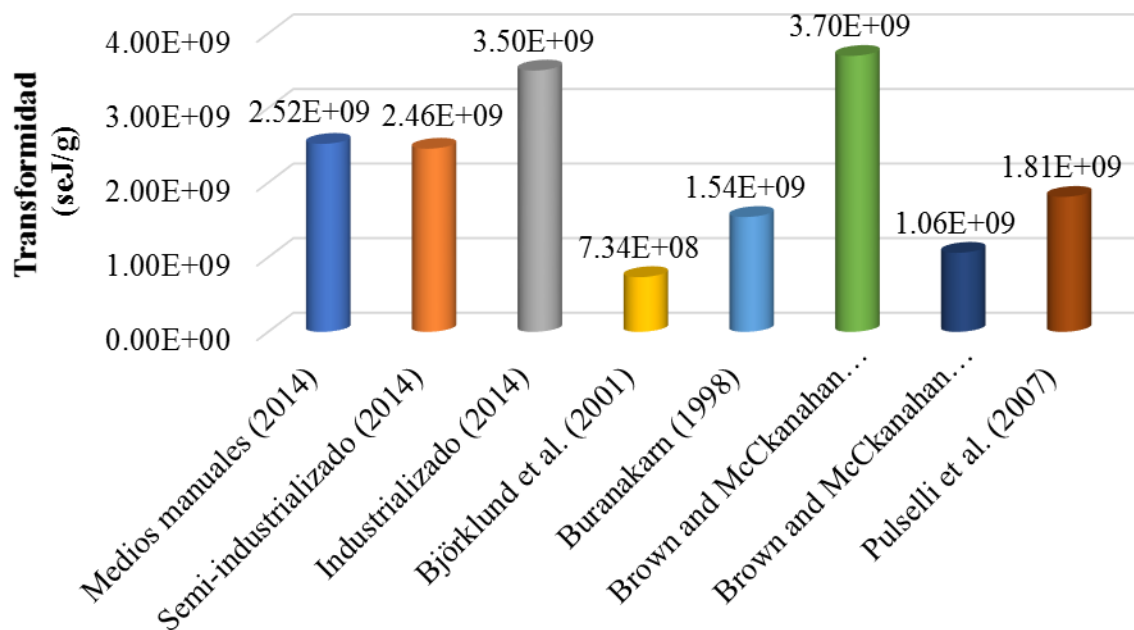


Figura 7. Comparación de las Transformidades del concreto.

El análisis eMergético de la producción de concreto bajo control de calidad toma en cuenta varios pasos en el proceso, que van desde los procedimientos para la producción de materiales hasta la elaboración del concreto mismo. Más que los procedimientos para la producción de materiales, los resultados ponen de manifiesto el impacto del uso de materiales de cantera, que representan un alto porcentaje de la eMergía total. Estos son vistos como recursos con alta Transformidad proporcionados por ciclos sedimentarios naturales y contabilizados en seJ. En este sentido, el análisis destaca el papel crítico del uso excesivo de recursos no renovables en la industria de la construcción, ya que considera el trabajo de la naturaleza (ciclo sedimentario), y no sólo el trabajo humano en las canteras (el único proceso contabilizado en el análisis económico). La contribución dominante de los recursos minerales subraya la insustentabilidad de la industria de la construcción.

La Transformidad se presenta como una medida de la utilización de los recursos del medio ambiente debido a los materiales de construcción; proporcionando una clasificación de materiales de construcción sobre la base de una jerarquía de energía. El análisis de eMergía combina calidad (Transformidad) con la cantidad (energía o masa). El impacto ambiental del proceso de construcción dependerá de la elección de los materiales (calidad en términos de costo ambiental debido al uso de la energía y la materia) y del propio proyecto (cantidad de materiales necesarios para construir elementos estructurales), buscando implementar técnicas de reutilización y/o reuso de materiales para mitigar su impacto ambiental. La Transformidad resalta el hecho de que la mano de obra empleada hace la diferencia entre las técnicas semi-industrializada ( $4.44E+12$ ) y con medios manuales ( $3.00E+13$ ), en razón de su productividad. Por lo anterior, se puede decir que este indicador se presenta como una medida de la utilización de los recursos del medio ambiente debido a los materiales de construcción, y es un parámetro intensivo que proporciona una clasificación de los materiales de construcción sobre la base de una jerarquía de energía. Finalmente, de acuerdo con Burón Maestro (2012), la sustentabilidad no es una característica que representa un valor absoluto. Es un concepto que sirve para comparar y elegir del modo más conveniente para que el desarrollo de la sociedad, en un tiempo determinado, no comprometa el desarrollo futuro de la misma en otro momento posterior a aquél en el que se toma la decisión que toda elección conlleva. No hay soluciones sustentables, existen soluciones más sustentables que otras.

#### 4. CONCLUSIONES

El método eMergético permitió tener una visión con una fuerte componente ecológica de las relaciones entre los sistemas naturales y las actividades antrópicas, y ayuda a buscar estrategias que acerquen a la sustentabilidad.

El EIR se evaluó como un indicador de sustentabilidad para evaluar la dependencia de fuentes locales o externas. Se demostró que los procesos de producción de concreto dependen en gran medida de los insumos adquiridos (flujo de eMergía de importaciones).

El ESI se empleó como medida de la contribución del sistema jerárquicamente superior a la producción del sistema por unidad de carga del mismo. Los resultados señalan que la producción de concreto semi-industrializado es más sustentable comparado con los concretos fabricados con medios manuales y los industrializados.

Finalmente, el análisis eMergético proporciona una medida de la sustentabilidad de las técnicas de control de calidad empleadas en la producción de concreto estudiadas en términos de inversión de energía. Muchas unidades de baja calidad de energía se utilizan para proporcionar una energía de alta calidad (Transformidad alta). La energía se materializa a través de una cadena de procesos de transformación y su memoria se conserva en el marco de la producción.

#### 5. REFERENCIAS

- Ascione, M., Campanella, L., Cherubini, F., & Ulgiati, S. (2009). Environmental driving forces of urban growth and development. An energy-based assessment of the city of Rome, Italy. *Landscape and Urban Planning*, 93(3–4), 238–249.
- Abel, T. (2015). Convergence and divergence in the production of energy transformation hierarchies. *Ecological Modelling*, 4–11.
- Agostinho, F., Bertaglia, A., Almeida, C., & Gianetti, B. (2015). Influence of cellulase enzyme production on the energetic–environmental performance of lignocellulosic ethanol. *Ecological Modelling*, 46–56.



- Aguilar Rivera, N., Alejandro Rosas, J., & Espinosa López, R. (2015). Evaluación emergy Y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, México. *INCA Cultivos Tropicales*, 2015, vol. 36, no. 4, 144-157.
- Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2003). Emergy and Life-Cycle assesment of steel production in Europe. Gainesville, Florida, E.U.: University of Florida.
- Bastianoni, S., Galli, A., Pulselli, R. M., & Niccolucci, V. (2007). Environmental and economic evaluation of natural capital appropriation through building construction: practical case study in the Italian context. *Ambio*.
- Bastianoni, S., Morandi, F., Flaminio, T., Pulselli, R. M., & Tiezzi, E. B. (2011). Emergy and emergy algebra explained by means of ingenious set theory. *Ecological Modelling*, 2903– 2907.
- Berardi, U. (2012). Sustainability assessment in the construction sector: rating systems and rated buildings. *Sustainable Development*, 411-424.
- Björklund, J., Geber, U., & Rydberg, T. (2001). Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, 293 - 316.
- Brown, M. T., & Buranakarn, V. (2003). Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, 1 - 22.
- Brown, M. T., Odum, H. T., & Jorgensen, S. E. (2004). Energy hierarchy and transformity in the universe. *Ecological Modelling*, 17 - 28.
- Brown, M., & Ulgiati, S. (2004). Emergy Analysys and Environmental Accounting. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 329 - 354.
- Brown, M. T., & McClanahan, T. R. (1992). *Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. Final Report to the Cousteau Society*. Gainesville, FL.: Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida.
- Buranakarn, V. (1998). *Evaluation of recycle and reuse of building materials using the emergy analysis method*. Ph.D. Dissertation. University of Florida, FL.
- Burón Maestro, M. (2012). El hormigón y la sostenibilidad en la normativa. *Sostenibilidad: Eficiencia Energética, Evaluación de edificios y estructuras*. Madrid, España: IECA.
- Campbell, E. (2015). Emergy analysis of emerging methods of fossil fuel production. *Ecological Modelling*, 57–68.
- CEIEG. (2016). *Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica. Gobierno del Estado de Chiapas*. Obtenido de <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/perfiles/Inicio>
- Doherty, S. J., Scatena, F. N., & Odum, H. T. (1994). *Emergy Evaluation of the Luquillo Experimental Forest and Puerto Rico. Final Report to International Institute of Tropical Forestry*. Rio Piedras, Puerto Rico.
- Emergy Synthesis, 8. (2015). Emergy and environmental accounting: Theories, applications, and methodologies. *Ecological Modelling*, 1-3.
- Ferreira C, Ó. I., Hurtado S, M. d., García, E., Bonilla Correa, C. R., & M. Rao, I. (2010). Emergía de tres sistemas agroforestales en el sur del municipio. *ACTA AGRONÓMICA*. 59 (3), 327-337.
- Guillén, H. A. (1998). Sustainability of Ecotourism and Traditional Agricultural Practices in Chiapas, México. Gainesville, Florida, E.U.: Tesis Doctoral.
- Gutierrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia.: Centro de publicaciones de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- Hamza, N., & Horne, M. (2007). Educating the designer: An operational model for visualizing low-energy architecture. *Building and Environment*, 3841-3847.
- INEGI. (2015). *Encuesta mensual de la industria manufacturera. Estadísticas históricas de México 2014-2015*.

- Josa, A., Aguado, A., Cardim, A., & Byars, E. (2007). Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. *Cement Concrete Research*, 781 - 788.
- Josa, A., Aguado, A., Heino, A., Byars, E., & Cardim, A. (2004). Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cement Concrete Research*, 1313 - 1320.
- Kjellsen, K., Guimaraes, M., & Nilsson, A. (2005). *The CO2 Balance of Concrete in a Life Cycle Perspective*. Danish Technological-DTI.
- Lacarrière, B., Deutz, K., Jamali Zghal, N., & Le Corre, O. (2015). Emergy assessment of the benefits of closed-loop recycling accounting for material losses. *Ecological Modelling*, 77–87.
- Li, L., Lu, H., Tilley, D., & Qiu, G. (2014). Effect of time scale on accounting for renewable energy in ecosystems located in humid and arid climates. *Ecological Modelling*, 1–8.
- López Villalobos, I. D., & Rodríguez Salcedo, J. (2013). Análisis energético de la sostenibilidad ambiental del municipio de Palmira (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Vol. 4 No. 2.
- Mendoza Sánchez, J. F. (2014). *Criterios de sustentabilidad para carreteras en México*. Sanfandila: Publicación Técnica No. 392, Instituto Mexicano del Transporte.
- Morandi, F., Campbell, D. E., Pulselli, F. M., & Bastianoni, S. (2015). Emergy evaluation of hierarchically nested systems: application to EU27 Italy and Tuscany and consequences for the meaning of emergy indicators. *Ecological Modelling*, 12–27.
- Mu, H., Feng, X., & Chu, K. H. (2012). Calculation of emergy flows within complex chemical production systems. *Ecological Engineering*, 88– 93.
- Nazar, M. (2013). *Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero atribuibles a la construcción de viviendas multifamiliares de interés social*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Tesis Doctoral.
- Nisbet, M., & Van Geem, M. G. (1997). Environmental life cycle inventory of Portland cement and concrete. *World Cement*, 3.
- Odum, H. T. (1971). *Environment. Power and Society*. Wiley, New York, NJ.
- Odum, H. T. (1983). *Environment. Power and Society*. Wiley, New York, NJ.
- Odum, H. T. (1988). Self organization, transformity and information. *Science*, 1132 - 1139.
- Odum, H. T. (1996). *Environmental Accounting Emergy and Environmental Decision Making*. New York, NJ.: John Wiley and Sons, Inc.
- Ortega Rodríguez, E., Vallim de Melo, C., & Del Pozo Rodríguez P, P. (2014). El análisis energético como herramienta para evaluar la sustentabilidad en dos sistemas productivos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias Vol. 23, No. 4*, 59-63.
- Pade, C., & Guimaraes, M. (2007). The CO2 uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement Concrete Research*, 1348-1356.
- Pulselli, R. M., Simoncini, E., F.M. Pulselli, F. M., & Bastianoni, S. (2007). Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and Buildings*, 620-628.
- Pulselli, R. M., Simoncini, E., Ridolfi, R., & Bastianoni, S. (2008). Specific emergy of cement and concrete: An energy-based appraisal of building materials and their transport. *Ecological Indicators*, 647 - 656.
- Ruiz de Arbuló Lopez, P., Landeta Manzano, B., Díaz de Basurto Uruga, P., & Arana Landín, G. (2016). Adopción de Sistemas de Gestión de Ecodiseño en el sector de la construcción. Análisis de la perspectiva de los diferentes agentes involucrados. *Dyna*, 124-133.
- Suca A, F., Suca A, A., & Siche J, R. (2014). Análisis energético del café peruano. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química Vol. 17 N.º 1*, 43-57.
- Tennenbaum, S. E. (2015). Emergy and co-emergy. *Ecological Modelling*, 116–134.

- Tilley, D. R. (2015). Transformity dynamics related to maximum power for improved emergy yield estimations. *Ecological Modelling*, 96–107.
- Vega, L., Ordoñez, J., & Pinilla, G. (2013). Towards a systemic assessment of environmental impact (SAEI) regarding alternative hydrosedimentological management practice in the Canal del Dique, Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 41-48.
- Vilbiss, C., & Brown, M. (2015). New method to compute the emergy of crustal minerals. *Ecological Modelling*, 108–115.
- Vold, M., & Ronning, A. (1995). LCA of Cement and Concrete. *Stiftelsen*.
- Wright, C., & Ostergard, H. (2015). Scales of renewability exemplified by a case study of three Danish pig production systems. *Ecological Modelling*, 28–36.
- Wu, X., Wu, F., Tong, X., Wu, J., Sun, L., & Peng, X. (2015). Emergy and greenhouse gas assessment of a sustainable, integrated agricultural model (SIAM) for plant, animal and biogas production: Analysis of the ecological recycle of wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 40-50.
- Zarba, L., & Brown, M. T. (2015). Cycling emergy: computing emergy in trophic networks. *Ecological Modelling*, 37–45.